



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

ULB

# **Simulationsbasierte Optimierung der Ausstattung von Teilstrecken mit Systemen zur Energieversorgung von Lastkraftwagen während der Fahrt**

Rolko, Kevin  
(2020)

DOI (TUprints): <https://doi.org/10.25534/tuprints-00013358>

Lizenz:



CC-BY-SA 4.0 International - Creative Commons, Namensnennung, Weitergabe unter gleichen Bedingungen

Publikationstyp: Dissertation

Fachbereich: 13 Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften

Quelle des Originals: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/13358>

---

---

# Simulationsbasierte Optimierung der Ausstattung von Teilstrecken mit Systemen zur Energieversorgung von Lastkraftwagen während der Fahrt

---

**M.Sc. Kevin Rolko**

geboren in Hanau



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Institut für Verkehrsplanung  
und Verkehrstechnik

Institute of Transport Planning  
and Traffic Engineering

Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze

Vom Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Technischen Universität Darmstadt zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation.

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze

Korreferent: Prof. Dr. Hanno Friedrich

---

Verfasser: M.Sc. Kevin Rolko  
Titel der Dissertation: Simulationsbasierte Optimierung der Ausstattung  
von Teilstrecken mit Systemen zur Energieversorgung  
von Lastkraftwagen während der Fahrt  
Dissertationsort: Darmstadt, Technische Universität Darmstadt

Tag der Einreichung: 30.04.2020

Tag der mündlichen Prüfung: 07.07.2020

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUpriints: 2020

Veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses>

Herausgeber:

Technische Universität Darmstadt  
Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik  
Otto-Berndt-Straße 2  
64287 Darmstadt

[www.tu-darmstadt.de/verkehr](http://www.tu-darmstadt.de/verkehr)  
[fgvv@verkehr.tu-darmstadt.de](mailto:fgvv@verkehr.tu-darmstadt.de)

Schriftenreihe der Institute für Verkehr  
Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik  
Heft V44

ISSN 1613-8317

---

---

## Danksagung

---

*Since all models are wrong the scientist cannot obtain a "correct" one by excessive elaboration. On the contrary following William of Occam, he should seek an economical description of natural phenomena. Just as the ability to devise simple but evocative models is the signature of the great scientist so over-elaboration and overparameterization is often the mark of mediocrity.*

**George Cox, (\*1919 - †2013) brit. Statistiker und u.a. Erfinder der Box-Cox-Transformation**

Für mich war das Anfertigen dieser Dissertationsschrift zunächst eine Reise ins Ungewisse: weder der Weg noch das Ziel waren mir vorab bekannt. Sicher war nur, dass ich aufbrechen will. Nun, wo das Ziel erreicht und diese Dissertationsschrift fertiggestellt ist, möchte ich mich bei all Jenen bedanken, die mich auf diesem Weg begleitet haben. Ohne die Unterstützung zahlreicher Personen und Institutionen hätte sie in dieser Form nicht verfasst werden können. Für die vielfältig erfahrenen Hilfestellungen und Ermutigungen auf meiner Reise möchte ich mich an dieser Stelle bei allen Weggefährten sehr herzlich bedanken.

Mein besonderer Dank gilt zunächst meinem Doktorvater Herrn **Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze**, der mir am Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik der Technischen Universität Darmstadt eine wissenschaftliche Heimat bereitet und meine Arbeit stets mit viel Verständnis, konstruktiver Kritik und all seiner Erfahrung begleitet hat. Für seine Anregungen und Impulse danke ich ebenso Herrn **Prof. Dr. Hanno Friedrich**, der meine Doktorarbeit als Korreferent betreut und mich als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Juniorprofessur Wirtschaftsverkehr für die Verkehrsnachfragemodellierung begeistert hat.

Danken möchte ich für ihre Unterstützung und vielen lieben Worte während der Erarbeitung meiner Dissertation auch meinen ehemaligen **Kolleginnen und Kollegen am Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik**: Wei Jiang, Regina Linke, Karin Menges, Nicole von Stetten, Kim Wilke, Marc Lüke, Tobias Monzert, Özgür Öztürk (Ph.D), Ferdinand Schöpp, Danny Wauri und Jürgen Klaus Wilke. Für anregende Diskussionen bin ich auch meinen ehemaligen **Kollegen der Juniorprofessur Wirtschaftsverkehr**, namentlich Dr.-Ing. Ole Ottemöller und Dr.-Ing. Andreas Balster, dankbar. Im Kontext meiner Arbeit im **Projekt ELISA**, dem *eHighway*-Feldversuch in Hessen, gilt mein Dank dem gesamten **Kollegium**, im Besonderen den Herren Michael Otto, Dr.-Ing. Achim Reußwig und Holger Sommer für die Bereitstellung wertvoller Informationen.

Für ihre Geduld, ihre Ermutigungen und manchmal, besonders während der Modellentwicklung, auch ihren Trost, bedanke ich mich von Herzen bei meiner **Freundin Svenja Hecht**. Außerdem möchte ich mich bei **meinen Eltern und allen Mitgliedern meiner Familie** für ihren Beistand während dieser entbehrungsreichen aber für mich zugleich auch ungemein bereichernden Zeit bedanken. Dazu zähle ich selbstverständlich auch die **Familie meiner Freundin**. Meinem **Freundeskreis** danke ich für steten Zuspruch, ständigen Rückhalt und die zuweilen nötige Ablenkung.

Widmen möchte ich diese Arbeit **meinen Großeltern**, die mir heute noch Vorbilder sind für alles, was sie im Leben erreicht haben.



---

## Kurzzusammenfassung

---

Im Spannungsfeld zwischen einer steigenden Güterverkehrsleistung, politischen Klimaschutzzielen und der Vermeidung einer Gesundheitsbelastung für den Menschen gilt es, in naher Zukunft **Alternativen zu Verbrennungsmotoren** für den **Straßengüterverkehr** zu finden. Während derzeit der Fokus der gesellschaftlichen Debatte noch auf Antriebssystemen wie der Brennstoffzelle oder Energieversorgungssystemen liegt, die auf dem Prinzip der stationären Ladung beruhen, werden zunehmend auch Systeme entwickelt und erprobt, die eine **Energieversorgung von Elektrofahrzeugen während der Fahrt** ermöglichen sollen.

Solche Systeme kombinieren einerseits **straßenseitig installierte Systemelemente**, die in ihrer Gesamtheit als Ladestationen aufgefasst werden können, mit **fahrzeugseitig verbauten Systemelementen** (z.B. Energieaufnahmeeinrichtungen, Energiespeicher). Im Gegensatz zu den stationären Energieversorgungssystemen, die mit großen fahrzeugseitig verbauten Energiespeichern arbeiten müssen, können die Energiespeicher in Abhängigkeit des Ausstattungsgrades des Straßennetzes mit Ladestationen bei diesen Systemen jedoch kleiner dimensioniert werden. Hierdurch fällt auch die Reduktion der zur Verfügung stehenden Nutzlast der Lastkraftwagen weniger stark aus. Für den Fall einer auf Ebene des Gesamtnetzes durchgängig zur Verfügung stehenden Ladeinfrastruktur kann sogar vollständig auf die Mitführung eines fahrzeuginternen Energiespeichers verzichtet werden. Wegen der Energiespeicher in den Fahrzeugen können aber auch besonders kostenintensiv oder überhaupt nicht ausstattbare Streckenelemente ausgespart werden.

Mit Blick auf den steigenden Wettbewerbsdruck in der Logistikbranche weisen Systeme zur Energieversorgung von Lastkraftwagen während der Fahrt einerseits **geringere fahrleistungsbezogene Betriebskosten** im Vergleich zu stationären Energieversorgungssystemen oder anderen Antriebstechnologien auf. Andererseits sind diese Systeme auch auf Basis einer Lebenszyklusbetrachtung hinsichtlich ihrer **Umweltwirkungen** schonender für die Menschen und die Umwelt. Aus diesen Gründen kann die Einführung von Systemen zur Energieversorgung von Lastkraftwagen während der Fahrt eine mögliche und **vielversprechende Handlungsoption** zur Überwindung des skizzierten Spannungsfelds darstellen.

Im Zuge der Einführung solcher Systeme ist es aus verkehrsplanerischer Sicht notwendig, solche **Teilstrecken** zu **identifizieren** und für eine **Ausstattung mit Systemelementen** zur Energieversorgung von Lastkraftwagen während der Fahrt vorzusehen, die im Hinblick auf die politischen Ziele einerseits einen möglichst hohen **positiven Beitrag** leisten sowie deren Einbindung in logistische Prozessketten andererseits ein möglichst **hohes Nutzerpotential** ausschöpfen kann. Im Ergebnis entsteht dann eine **Netzkonfiguration** für ein bestimmtes Energieversorgungssystem, mit der zum Beispiel ein bestimmtes Minderungspotential an Kohlendioxid-Emissionen verbunden ist. Da aber potentiell mehrere dieser Systeme eingeführt werden könnten, ist es zudem in diesem Kontext eine verkehrsplanerische Aufgabenstellung, diese **Systeme vergleichend** im Hinblick auf ihren Beitrag zu einem Zielsystem **zu bewerten** oder ihr Nutzen-Kosten-Verhältnis zu untersuchen, wozu ebenfalls eine konkrete Netzkonfiguration benötigt wird.

Hinsichtlich dieser beiden neuartigen Aufgabenstellungen war es daher das **oberste Ziel dieser Arbeit**, ein **Verfahren zur Optimierung der Ausstattung deutscher Autobahnen mit Systemen zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt** zu entwickeln. Dieses Verfahren sollte zum Ersten die

---

---

Möglichkeit bieten, eine bedarfsgerechte und bestenfalls auch im mathematischen Sinne **optimale Netzkonfiguration** für ein bestimmtes System zur Energieversorgung von Lastkraftwagen während der Fahrt auf Basis eines vorab definierten Bewertungsmaßstabs zu ermitteln. Da die verschiedenen Systeme auch unterschiedliche Anforderungen an die Eigenschaften der jeweiligen räumlich-örtlichen Begebenheiten entlang der Teilstrecken stellen, die unter Umständen zu erhöhten kilometerbezogenen Kostensätzen einer Ausstattung führen können, sollten in dem zu entwickelnden Verfahren auch **infrastrukturelle Bewertungskriterien** berücksichtigt werden. Darüber hinaus sollte das zu entwickelnde Verfahren eine **vergleichende Bewertung unterschiedlicher Netzkonfigurationen verschiedener Systeme** zur Energieversorgung des Straßengüterverkehrs während der Fahrt auf deutschen Autobahnen ermöglichen.

Das im Rahmen dieser Arbeit vorgeschlagene Verfahren besteht daher aus **drei eigenständig und unabhängig durchführbaren**, jedoch aufeinander abgestimmten **Verfahrensteilen**. Die Verfahrensteile wurden im Verlauf der Arbeit zunächst formal und prozessual beschrieben, um sie unabhängig von einer konkreten Implementierung oder Software-Anwendung einsetzen zu können. Der **erste Verfahrensteil Güterverkehrsnachfrage** dient der **Bereitstellung einer Datengrundlage** hinsichtlich der Güterverkehrsnachfrage für einen beliebigen Planungsraum und Untersuchungszeitpunkt, um eine nachfragegerechte Ableitung von Netzkonfigurationen zu ermöglichen. Der Verfahrensteil ist daher auch **anwendungsfallspezifisch** auszugestalten, es kann hierfür auf das Standard-Instrumentarium der **Verkehrsnachfragemodellierung** zurückgegriffen werden. Der Verfahrensteil erfordert als Endprodukt eine auf **Ebene der Knotenbeziehungen** im unterstellten Verkehrsnetzmodell disaggregierte **Relationsliste**, die Fahrzeugfahrten zwischen diesen Knoten abbildet.

Der **zweite Verfahrensteil Infrastrukturbewertung** dient der **Bewertung von Streckenelementen** und Streckenabschnitten hinsichtlich ihrer Ausstattungsfähigkeit mit Ladeinfrastruktur-Elementen verschiedener Systeme zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt aus einer **planerisch-bautechnischen Perspektive**. Zudem ermöglicht der Verfahrensteil die Ableitung von Ausstattungsvarianten für bestimmte, räumlich begrenzte Teilstrecken sowie deren Vergleich aus einer planerisch-bautechnischen Perspektive. Methodisch greift das Verfahren auf eine **modifizierte Nutzwertanalyse** zurück, die jedem Streckenelement bzw. -abschnitt einen Nutzwert zuordnet, um auf dessen Basis die binäre Aussage treffen zu können, ob das betreffende Streckenelement bzw. der Streckenabschnitt ausgestattet werden kann oder nicht. Auf Basis der Ergebnisse des Verfahrensteils können somit verlässlichere Kostenschätzungen vorgenommen werden.

Die Ergebnisse des Verfahrensteils *Infrastrukturbewertung* auf der einen Seite sowie die Relationsliste aus dem Verfahrensteil *Güterverkehrsnachfrage* auf der anderen Seite dienen als Eingangsdaten für einen dritten Verfahrensteil. Dieser **dritte Verfahrensteil Lageermittlung** dient der **räumlichen Verortung von Ladestationen** auf einem Verkehrsnetzmodell. Somit lassen sich also mit dem Verfahrensteil **unterschiedliche Netzkonfigurationen** erzeugen und bewerten. Methodisch greift der Verfahrensteil auf die simulationsbasierte Optimierung zurück.

In der **Simulationskomponente** des Verfahrensteils wird je durchgeführtem Simulationsexperiment eine Netzwerkkonfiguration des jeweils unterstellten Energieversorgungssystems erzeugt. Dabei werden auch die Ergebnisse der Infrastrukturbewertung berücksichtigt. Diese Netzkonfiguration wird an die **Optimierungskomponente** weitergegeben, die einerseits den Verfahrensablauf steuert und andererseits die Netzkonfiguration bewertet. Hierzu wurde eine Ziel- bzw. Bewertungsfunktion vorgeschlagen, die

---

auf eine Maximierung der eingesparten CO<sub>2</sub>-Emissionen unter Beachtung einer Budgetrestriktion abstellt. Im Ergebnis können so verschiedene Kenngrößen wie zum Beispiel die vermiedenen CO<sub>2</sub>-Emissionen, der finanzielle Bedarf für den Ausbau sowie die Fahrleistung in den verschiedenen Betriebsmodi ermittelt werden. Durch das mehrmalige Ausführen der Simulationskomponente bzw. eine Variation der Simulationsparameter und eine sukzessive Bewertung der Ergebnisse soll das Verfahren so eine **bedarfsgerechte** und bestenfalls auch im mathematischen Sinne **optimale Netzkonfiguration** für ein bestimmtes System zur Energieversorgung während der Fahrt ermitteln können.

Durch die Anwendung des entwickelten Verfahrens auf das **eHighway-System** für den **Planungsraum der deutschen Autobahnen** liefert diese Arbeit neben einem methodischen Beitrag auch **praxisrelevante Erkenntnisse**. Um dies in einem weiteren Untersuchungsschritt zu ermöglichen, wurde auf Basis des zuvor entwickelten und formal beschriebenen, generischen Verfahrens **ein gekoppeltes Simulations- und Optimierungsmodell** mit der Bezeichnung OAASEE entworfen und als eigenständige **Software-Applikation** implementiert. Das **Modell OAASEE** besteht konsequenterweise aus den drei gekoppelten und über Schnittstellen verbundenen Modulen Güterverkehrsnachfrage, Infrastrukturbewertung und Lageermittlung. OAASEE bietet dem Anwender umfangreiche Möglichkeiten zur Parametrisierung des Verfahrens über eine grafische Benutzeroberfläche und kann so unabhängig von einem konkreten Anwendungsfall eingesetzt werden.

Für den Anwendungsfall wurde im Rahmen des **Moduls Güterverkehrsnachfrage** auf Basis einer **Verflechtungsmatrix** eine Umwandlung von Güterströmen in **Fahrzeugströme** vorgenommen und diese wurden zwischen Netzeinspeiseknoten verteilt. Leider konnte das **Modul Infrastrukturbewertung nicht** im Rahmen des Anwendungsbeispiels **eingesetzt werden**, weil bei Fertigstellung der Arbeit noch kein Zugriff auf wichtige Daten bestand. Für das **Modul Lageermittlung** wurde OAASEE aber mit einer Stichprobe an Relationen aus dem Modul Güterverkehrsnachfrage versorgt und das Modul wurde anschließend auf Basis einer Literaturanalyse **parametrisiert**. Hierzu wurde ein **szenarienbasiertes Vorgehen** gewählt: jedes Szenario ist durch einen Parametersatz beschrieben. Neben einem Szenario, das auf den Dieselmotor als Antriebstechnologie abstellt und so einen Referenzpunkt zu Vergleichszwecken bietet, wurden insgesamt **drei** weitere **Szenarien** untersucht. Für jedes der drei Szenarien wurde dann durch OAASEE eine Netzkonfiguration für den **eHighway** auf deutschen Autobahnen abgeleitet. Auf Basis eines Vergleichs der drei resultierenden Netzkonfigurationen wurde eine **Ausbauempfehlung** für **besonders geeignete Korridore** formuliert und diese genutzt, um entsprechende **Kenngrößen** zu erzeugen. Die Modellergebnisse wurden außerdem in die **vorhandene Veröffentlichungslandschaft** eingeordnet.

Das im Laufe dieser Arbeit vorgestellte, simulationsbasierte Optimierungsverfahren ist prinzipiell auch auf den Personenverkehr und weitere Nutzergruppen anwendbar und leistet somit einen Beitrag für eine **vergleichende, volkswirtschaftliche Bewertung verschiedener Systeme** zur Energieversorgung des Elektroverkehrs während der Fahrt. Langfristig kann die gesamtgesellschaftliche Akzeptanz der Systeme zur Energieversorgung des Elektroverkehrs während der Fahrt durch einen solchen, möglichst transparenten Bewertungsprozess gesteigert und die Weichen für einen nachhaltigen Straßenverkehr können gestellt werden.

---

---

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 1-1:	Struktur der Arbeit und Gang der Untersuchung .....	10
Abbildung 2-1:	System, Systemumwelt und Elemente .....	14
Abbildung 2-2:	Verkehrssysteme und ihre Einbettung in das Gesellschaftssystem .....	16
Abbildung 2-3:	Zusammenhang zwischen Logistik- und Güterverkehrsnachfrage.....	19
Abbildung 2-4:	Güterverkehr als Teil des Wirtschaftsverkehr .....	20
Abbildung 2-5:	Zusammenhang von Logistik, Verkehr und Transport .....	22
Abbildung 2-6:	Größe der europ.Logistikmärkte nach Umsatz in Mrd. EUR und Ländern in 2015 .....	24
Abbildung 2-7:	Anteilige Aufteilung des Logistikmarkt-Volumens auf logistische Leistungsbereiche .....	25
Abbildung 2-8:	Umsatz nach Marktsegmenten, Deutschland, 2016 .....	26
Abbildung 2-9:	Verteilung der Betriebe im Wirtschaftszweig Verkehr und Lagerei auf Größenklassen, 2008 bis 2016 .....	27
Abbildung 2-10:	Bewertung von Standortfaktoren aus Sicht von Logistikunternehmen .....	28
Abbildung 2-11:	Verteilung der Standorte von Logistikdienstleistern auf Kreise und kreisfreie Städte, Jahr: 2019.....	30
Abbildung 2-12:	Verteilung der Standorte auf Entfernungsklassen (in km) .....	32
Abbildung 2-13:	Prinzipielle Typen von Transportketten im Straßengüterverkehr .....	33
Abbildung 2-14:	Grundkonfigurationen von Transportnetzwerken.....	41
Abbildung 3-1:	Beziehungsdreieck bei der Modellbildung .....	46
Abbildung 3-2:	Klassifizierung von Modellen .....	48
Abbildung 3-3:	Vorgehen zur modellbasierten Problemlösung .....	49
Abbildung 3-4:	Überführung der Systembeschreibung in ein mathematisches Modell .....	52
Abbildung 3-5:	Vorgehen bei der Bildung von Optimierungsmodellen .....	54
Abbildung 3-6:	Übersicht der Lösungsverfahren für Optimierungsmodelle.....	57
Abbildung 3-7:	Klassifikation von Metaheuristiken.....	61
Abbildung 3-8:	Grundaufbau einer Scatter Search .....	63
Abbildung 3-9:	Übersicht des Modellbildungsprozesses.....	64
Abbildung 3-10:	Generischer Aufbau einer simulationsbasierten Optimierung .....	66
Abbildung 3-11:	Verkehrsmanagement und dessen verschiedenen Aufgabenbereichen .....	70
Abbildung 3-12:	Verkehrsplanungsprozess .....	72
Abbildung 3-13:	Zusammenhang zwischen Prognosefällen, Szenarien sowie Wirkungs- und Anforderungsprofil.....	75
Abbildung 3-14:	Übersicht von Methoden zur Wirkungsabschätzung verkehrsplanerischer Handlungskonzepte. ....	76
Abbildung 3-15:	Übersicht von Methoden zur verkehrsplanerischen Bewertung .....	81
Abbildung 3-16:	Illustration eines Wirkungsprofil .....	84
Abbildung 3-17:	Zusammenwirken des Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodells .....	89
Abbildung 3-18:	Modellschritte und Modellobjekte in Bezug auf die Modellierung der Güterverkehrsnachfrage.....	91
Abbildung 4-1:	Formen der Energieversorgung elektrischer Fahrzeuge .....	100
Abbildung 4-2:	Anordnungsmöglichkeiten infrastrukturseitiger Komponenten.....	101
Abbildung 4-3:	Mögliche Ausprägungen von ERS.....	105
Abbildung 4-4:	Systemaufbau eHighway .....	106
Abbildung 4-5:	Entwicklungsverlauf des eHighway-Systems. ....	111
Abbildung 4-6:	Aufbau des Honda-Systems.....	112
Abbildung 4-7:	Elemente des Honda-Systems.....	113
Abbildung 4-8:	Aufbau des Elonroad-Systems. ....	115
Abbildung 4-9:	Stromabnehmer im Elonroad-System.....	116
Abbildung 4-10:	Elonroad-Teststrecke.....	117
Abbildung 4-11:	Systemaufbau OLEV.....	119

Abbildung 4-12: Fahrbahn-Querschnitt des OLEV-Systems.....	119
Abbildung 4-13: Ferritkern-Struktur des OLEV-Systems. ....	120
Abbildung 5-1: Überblick der vorbereitenden Verfahrensteile Infrastrukturbewertung und Güterverkehrsnachfrage .....	132
Abbildung 5-2: Überblick des Verfahrensteils Lageermittlung. ....	133
Abbildung 5-3: Verfahrensmodi in Abhängigkeit einer verkehrsplanerischen Aufgabenstellung. ....	136
Abbildung 5-4: Illustration der Begriffe Teilstrecke, Streckenabschnitt und Streckenelement. ....	138
Abbildung 5-5: Ablauf des Verfahrensteils Infrastrukturbewertung. ....	141
Abbildung 5-6: Übersicht der Bewertungskriterien nach Bewertungsobjekt und Kategorie.....	144
Abbildung 5-7: Relevanz der Bewertungskriterien in Abhängigkeit d. Form d. Energieübertragung.....	146
Abbildung 5-8: Schematische Darstellung des Vorgehens bei der Bewertung von Streckenelementen.....	147
Abbildung 5-9: Übersicht der Kriterien auf Ebene der Streckenelemente.....	148
Abbildung 5-10: Anordnungsmöglichkeiten eines Streckenabschnitts in einer Teilstrecke.....	151
Abbildung 5-11: Bewertungskriterien für Streckenabschnitte mit Bewertungsstufen.....	152
Abbildung 5-12: Aufbau des gekoppelten Simulations- und Optimierungsmodells im Rahmen des Verfahrensteils Lageermittlung. ....	156
Abbildung 5-13: Unterprozess Simulationsexperiment durchführen.....	159
Abbildung 5-14: Ablauf des Unterprozesses „Fahrt durchführen“. ....	162
Abbildung 5-15: Ablauf des Prozesses „Ladeoptionen prüfen“.....	164
Abbildung 6-1: Vorzugs-Netzkonfiguration gemäß Roadmap OH-Lkw . ....	175
Abbildung 6-2: Fahrzeugkonfigurationen gemäß Roadmap OH-Lkw.....	176
Abbildung 6-3: Kohlendioxid-Emissionen im Jahr 2030 gemäß Roadmap OH-Lkw (Mio. t CO <sub>2eq</sub> ). ....	177
Abbildung 6-4: Hochlauf der mit Oberleitungen ausgestatteten Kilometer gemäß StratOn. ....	178
Abbildung 6-5: Übersicht der Netzausbaustufen gemäß StratOn. ....	179
Abbildung 6-6: Transportketten im BVWP.....	181
Abbildung 6-7: Vorgehen zur Bereinigung der BVWP-Verflechtungsmatrix. ....	182
Abbildung 6-8: Lorenzkurve zur Verteilung des Verkehrsaufkommens auf die Relationen, normiert als Summenhäufigkeiten. ....	185
Abbildung 6-9: Bereinigtes Verkehrsnetzmodell. ....	191
Abbildung 6-10: Verteilung der Autobahn-Anschlussstellen auf NUTS 3-Einheiten ....	192
Abbildung 6-11: Ausbaurkosten bei Vollausstattung des jeweiligen Stationstyps (in Mio. EUR). ....	194
Abbildung 6-12: Jährliche Verkehrsstärke (Fz/Jahr, 2030) im Diesel-Referenzfall. ....	197
Abbildung 6-13: Variation der Ergebnisse des Referenzfalls für die Kohlenstoffdioxid-Emissionen, in Mio. Tonnen pro Jahr, 2030, WtW .....	199
Abbildung 6-14: Ausgestattete Teilstrecken nach Stationstyp, Referenzfahrzeug OH-Lkw 5.....	202
Abbildung 6-15: Elektrische Fahrleistung in Mio. Fzkm pro Jahr, 2030, Referenzfahrzeug OH-Lkw 5. ....	203
Abbildung 6-16: Ausgestattete Teilstrecken nach Stationstyp, Referenzfahrzeug OH-Lkw 175.....	207
Abbildung 6-17: Ausgestattete Teilstrecken nach Stationstyp, Referenzfahrzeug OH-Lkw 300.....	209
Abbildung 6-18: Elektrische Fahrleistung in Mio. Fzkm, 2030, Referenzfahrzeug OH-Lkw 300. ....	211
Abbildung 6-19: Ausbaurkorridore auf Basis der Modellanwendung von OAASEE. ....	212
Abbildung A1-0-1: Bewertungskriterien Teil 1 .....	vi
Abbildung A1-0-2: Bewertungskriterien Teil 2 .....	vii
Abbildung A2-0-1: Bewertung der Kriterien in Bezug auf deren Quantifizierbarkeit sowie zur Datenverfügbarkeit .....	viii
Abbildung A2-0-2: Bewertung der Automatisierungspotentiale von Kriterien. ....	x
Abbildung A3-0-1: Aufbau des Software-Prototyp BeTSIE.....	xiii
Abbildung A3-0-2: Benutzeroberfläche von BeTSIE. ....	xiv
Abbildung A3-0-3: Illustration des BeTSIE-Programmablaufs. ....	xv
Abbildung A3-0-4: Übersicht der automatisiert bewertbaren Kriterien sowie deren Datenquellen. ....	xvii
Abbildung A3-0-5: Grafische Benutzeroberfläche des OAASEE-Moduls.....	xx

---

Abbildung A3-0-6: Simulations-Übersicht des OAASEE-Moduls. ....	xxi
Abbildung A3-0-7: Übersicht des Submoduls Fahrzeug. ....	xxii
Abbildung A4-0-1: Überblick Gesamtverfahren .....	xxv
Abbildung A5-0-1: Illustratives Beispiel möglicher volkswirtschaftlicher Kostenverläufe für Energieversorgungssysteme während der Fahrt .....	xxvi



---

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 2-1:	Übersicht wichtiger Kenngrößen der erfassten Standort-Stichprobe.....	26
Tabelle 2-2:	Verteilung der Standorte auf einzelne Größenklassen .....	28
Tabelle 2-3:	Eigenschaften und Merkmale der LDL-Typen. ....	33
Tabelle 3-1:	Technologiereifegrade gemäß der TRL-Skala .....	90
Tabelle 4-1:	Übersicht konduktiver Systeme zur kontinuierlichen Energieversorgung des Elektroverkehrs.....	100
Tabelle 4-2:	Übersicht induktiver Systeme zur kontinuierlichen Energieversorgung des Elektroverkehrs .....	101
Tabelle 4-3:	Ergebnisse der Förderprojekte ENUBA und ENUBA 2.....	107
Tabelle 4-4:	Zusammenfassung wichtiger Systemparameter. ....	119
Tabelle 5-1:	Übersicht der Anforderungen an ein mögliches Lösungsverfahren .....	127
Tabelle 5-2:	Übersicht möglicher Parameter in einem Simulationsexperiment.....	152
Tabelle 6-1:	Fahrzeugkonfiguration Diesel-Lkw. ....	184
Tabelle 6-2:	Fahrzeugkonfiguration OH-Lkw .....	185
Tabelle 6-3:	Technische Ausgestaltungsmöglichkeiten der Ladeinfrastruktur .....	186
Tabelle 6-4:	Unterstellter initialer Ladestand des Energiespeichers in kWh .....	190
Tabelle 6-5:	Übersicht der Ergebnisse des Referenzfalls für alle Kenngrößen.....	193
Tabelle 6-6:	Übersicht der Ergebnisse von BVWP, Roadmap OH-Lkw und OAASEE für den Diesel-Referenzfall .....	195
Tabelle 6-7:	Modellparameter für das Szenario OH-Lkw 5.....	197
Tabelle 6-8:	Kosten und Längen einer Teilstreckenausstattung nach Stationstyp, OH-Lkw 5. ....	201
Tabelle 6-9:	Modellparameter für das Szenario OH-Lkw 175.....	202
Tabelle 6-10:	Kosten und Längen einer Teilstreckenausstattung nach Stationstyp, OH-Lkw 175. ....	203
Tabelle 6-11:	Modellparameter für das Szenario OH-Lkw 300.....	205
Tabelle 6-12:	Kosten und Längen einer Teilstreckenausstattung nach Stationstyp, OH-Lkw 300. ....	207
Tabelle 6-13:	Ergebnisse einer Parametervariation der Energiespeicherkapazität für die Netzkonfiguration Hochleistung. ....	210
Tabelle 6-14:	Gegenüberstellung der Modellergebnisse und weiterer Studien .....	212

---

---

## Abkürzungsverzeichnis

---

ASIM	Arbeitsgemeinschaft Simulation
AC	Alternating Current (Wechselspannung)
ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BIP	Bruttoinlandsprodukt
bspw.	beispielsweise
BVWP	Bundesverkehrswegeplan
CAS	Complex Adaptive System (dt.: Komplex-adaptives System)
DC	Direct Current (Gleichspannung)
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLM	Digitales Landschaftsmodell
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
dt.	zu Deutsch
ENUBA	Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen
EPK	Ereignisgesteuerte Prozessketten
ERS	Electric Road Systems
EUR	Euro
FAR	Formalisiertes Abwägungs- und Rangordnungsverfahren
ff	nach einer Seitenzahl: und folgende Seiten
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
FFH	Fauna-Flora-Habitat
GIS	Geografisches Informationssystem
GKVS	Güterkraftverkehrsstatistik
GUI	Graphical User Interface
GVFG	Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz
ggf.	Gegebenenfalls
Hrsg.	Herausgeber
IGBT	Insulated-gate bipolar transistor
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologien
ITF	International Transport Forum
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
KEP	Kurier-, Express- und Paketdienste
km	Kilometer
kW	Kilowatt
KWA	Kosten-Wirksamkeits-Analyse
kWh	Kilowattstunde
LDL	Logistikdienstleistungsunternehmen
Lkw	Lastkraftwagen
LP	Lineare Programmierung
LPI	Logistics Performance Index
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NKA	Nutzen-Kosten-Analyse
NLP	Nichtlineare Programmierung
NWA	Nutzwertanalyse
MIV	Motorisierter Individualverkehr
OECD	Organisation für Sicherheit und Zusammenarbeit in Europa



---

OLEV	OnLine Electric Vehicle
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
OR	Operations Research
Pkw	Personenkraftwagen
QZ-Matrix	Quell-Ziel-Matrix bzw. Verflechtungsmatrix
REP	Road Electrification Problem
S.	Seite
SBO	Simulationsbasierte Optimierung
SQL	Structured Query Language
SWOT	“Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats”
TEN	Transeuropäischen Netze
TöB	Trägern öffentlicher Belange
TtW	Tank-To-Wheel
TÜV	Technischer Überwachungsverein
TWh	Terrawattstunde
u.a.	unter anderem
u.d.N.	unter den Nebenbedingungen
usw.	und so weiter
USD	US-Dollar
VDI	Verband Deutscher Ingenieure
vgl.	vergleiche
WtT	Well-to-Tank
WtW	Well-to-Wheel
z.B.	zum Beispiel

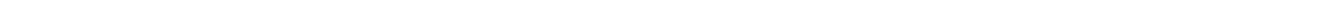
---

## Formelverzeichnis

Formel	Beschreibung	Seite	Lfd. Nr.
$\max/\min \quad z = f(x) \mid x \in X$	Allgemeine Formulierung eines Optimierungsmodells	51	2-1
$f(x^*) = \min/\max \{ f(x) \mid x \in X \}$	Bedingung für ein globales Optimum	52	2-2
$f(x_0) = \min/\max \{ f(x) \mid x \in U(x_0) \}$	Bedingung für ein lokales Optimum	52	2-3
$N_i = \sum_{j=1}^m n_{ij} = g_j * e_{ij}$	Ermittlungsvorschrift des Gesamtnutzwerts	86	3-1
$N_i = \sum_{z=1}^r n_{iz} * g_z$	Ermittlungsvorschrift des gewichteten Gesamtnutzwerts	139	5-1
$L_{p_r} = \sum_{s=1}^{s_{pr}} l_s * \delta_s$	Ermittlungsvorschrift für die Länge eines Pfades	167	5-2
$e_{t_r} = f_{t_r} * \gamma_{t_r} * L_{p_r} = f_{t_r} * \gamma_{t_r} * \left( \sum_{s=1}^{s_{pr}} l_s * \delta_s \right)$	Ermittlungsvorschrift für die Summe der eingesparten Emissionen einer Relation r	168	5-3
$E_D = \sum_{r=1}^D e_{t_r} = \sum_{r=1}^D f_{t_r} * \gamma_{t_r} * L_{p_r} = f_{t_r} * \gamma_{t_r} * \left( \sum_{s=1}^{s_{pr}} l_s * \delta_s \right)$	Ermittlungsvorschrift für die Summe der eingesparten Emissionen einer Relationsstichprobe D	168	5-4
$\max: E_D = \sum_{r=1}^D e_{t_r} = \sum_{r=1}^D f_{t_r} * \gamma_{t_r} * L_{p_r} = f_{t_r} * \gamma_{t_r} * \left( \sum_{s=1}^{s_{pr}} l_s * \delta_s \right)$	Zielfunktion im OAASEE-Optimierungsmodell	169	5-5
$\sum_{r=1}^D \sum_{s=1}^{s_{pr}} l_s * \delta_s * c_s \leq B$	Budget-Nebenbedingung im OAASEE-Optimierungsmodell	169	5-6
$\min: B = \sum_{r=1}^D \sum_{s=1}^{s_{pr}} l_s * \delta_s * c_s$	OAASEE-Optimierungsmodell als Variante Kostenminimierung	169	5-7



$\sum_{r=1}^D f_{t_r} * \gamma_{t_r} * \left( \sum_{s=1}^{S_{pr}} l_s * \delta_s \right) \geq G$	Emissions- Nebenbedingung im OAASEE- Optimierungsmodell Variante Kostenminimierung	169	5-7
$f_{nk} = \frac{b_{n,i}}{\sum_{n=1}^m B_i} * \frac{b_{k,j}}{\sum_{k=1}^l B_j} * F_{ij}$	Ermittlungsvorschrift zur Erzeugung des Fahrtenaufkommens	184	6-1



---

## Symbolverzeichnis

---

Symbol	Beschreibung	Einheit	Formel	Seite
$z$	Wert der Zielfunktion eines Optimierungsmodells	-	2-1	51
$x$	Entscheidungsvariable in einem Optimierungsmodell	-	2-1	51
$f(x)$	Ermittlungsvorschrift des Zielfunktionswerts $z$ in Abhängigkeit der Entscheidungsvariable $x$	-	2-1	51
$g_i(x)$	$i$ -te Nebenbedingung, die in Bezug auf die Entscheidungsvariable $x$ eingehalten werden muss	-	2-1	51
$x^*$	Wert der Entscheidungsvariable $x$ im globalen Optimum der Zielfunktion	-	2-2	51
$x_0$	Wert der Entscheidungsvariable $x$ im lokalen Optimum der Zielfunktion	-	2-3	52
$U(x_0)$	Umgebung des lokalen Optimums $x_0$	-	2-3	52
$N_i$	Nutzwert der Alternative $i$	-	3-1	86
$n_{ij}$	Teilnutzwert der Alternative $i$ in Bezug auf Kriterium $j$	-	3-1	86
$g_j$	Gewichtungsfaktor des Kriteriums $j$	-	3-1	86
$e_{ij}$	Punktwert der Alternative $i$ in Bezug auf das Kriterium $j$	-	3-1	82
$s$	Streckenelement	-	5-1	145
$z$	Bewertungskriterium	-	5-1	145
$g_z$	Gewichtungsfaktor des Kriteriums $z$	-	5-1	145
$n_{sz}$	Punktwert des Streckenelements $s$ in Bezug auf Kriterium $z$	-	5-1	145
$N_s$	Nutzwert des Streckenelements $s$	-	5-1	145
$r$	Relation	-	5-2	166
$D$	Menge aller Relationen einer Stichprobe	-	-	166
$o$	Quell-Netzeinspeiseknoten einer Relation	-	-	166
$d$	Ziel-Netzeinspeiseknoten $d$	-	-	166
$s$	Streckenelement	-	5-2	166

---

$l_s$	Länge des Streckenelements $s$	km	5-2	166
SE	Menge aller Streckenelemente eines Graphen	-	-	166
$p_r$	Pfad zwischen den Netzeinspeiseknoten $o$ und $d$	km	5-2	167
$S_{p_r}$	Menge der Streckenelemente des Pfades $p_r$	-	5-2	167
$\delta_s$	Binärvariable: Streckenelement $s$ ist ausgestattet oder nicht	(0,1)	5-2	167
$L_{p_r}$	Ausgestattete Streckenkilometer eines Pfades $p_{o,d}$	km	5-2	167
$t_r$	Lkw-Typ	-	5-3	168
T	Menge aller Lkw-Typen	-	5-3	168
$f_{t_r}$	Verkehrsaufkommen der Relation $r$	Lkw/Jahr	5-4	168
$e_{t_r}$	CO <sub>2</sub> -Emissionseinsparungen der Relation $r$ hinsichtlich Lkw-Typ $t$	g	5-4	168
$E_D$	Summe aller Kohlendioxid-Emissionseinsparungen einer Relationsstichprobe	g/Jahr	5-4	168
$\gamma_{t_r}$	Spezifische Kohlendioxid-Emissionseinsparung des Lkw-Typs $t$	g/(Lkw und km)	5-4	168
$c_s$	Systemspezifische Kostensatz zur Ausstattung eines Streckenkilometers	EUR/km	5-5	169
B	Ausbaubudget	EUR	5-5	169
G	Mindestsumme von CO <sub>2</sub> -Emissionseinsparungen	Mio. t /Jahr	5-6	169
$b_{n,i}$	Anzahl der sozialversicherungspflichtigen Beschäftigten der LAU 1-Einheit $n$ in NUTS 3-Einheit $i$	-	6-1	184
$b_{k,j}$	Anzahl der sozialversicherungspflichtigen Beschäftigten der LAU 1-Einheit $k$ in NUTS 3-Einheit $j$	-	6-1	184
$B_i$	Summe der sozialversicherungspflichtigen Beschäftigten in NUTS 3-Einheit $i$	-	6-1	184
$F_{ij}$	jährliches Verkehrsaufkommen zwischen den NUTS 3-Einheiten $i$ und $j$	Lkw/Jahr	6-1	184
$f_{nk}$	jährliches Verkehrsaufkommen zwischen den LAU 1-Einheiten $n$ und $k$	Lkw/Jahr	6-1	184

---

---

## Anlagenverzeichnis

---

Anlage 1:	Quellcode OAASEE	(AnyLogic-Projekt)
Anlage 2:	Quellcode BeTSIE	(AnyLogic-Projekt)
Anlage 3:	Quellcode Verfahrensteil Güterverkehrsnachfrage	(R-Skript)
Anlage 4:	Verfahrensübersicht	(Poster Format DIN A0)
Anlage 5a:	Ergebnis Teilstreckenausstattung Szenario OH-Lkw 5	(pdf-Datei)
Anlage 5b:	Ergebnis Teilstreckenausstattung Szenario OH-Lkw 175	(pdf-Datei)
Anlage 5c:	Ergebnis Teilstreckenausstattung Szenario OH-Lkw 300	(pdf-Datei)
Anlage 5d:	Ergebnis Netzausbaukorridore	(pdf-Datei)
Anlage 6:	Geodatenbank Verkehrsnetzmodell	(gdb-Datei)
Anlage 7:	Verfahrensteil Güterverkehrsnachfrage: Relationsliste	(pdf-Datei)
Anlage 8:	Verfahrensteil Infrastrukturbewertung: Bewertungskriterien	(pdf-Datei)
Anlage 9:	Verfahrensteil Lageermittlung: Ausbaukorridore	(Format DIN A0)
Anlage 10:	Ergebnisse und Vorgehen Lorenzkurve	(R-Skript)

---

## Inhaltsverzeichnis

---

Danksagung.....	i
Kurzzusammenfassung .....	ii
Abbildungsverzeichnis .....	v
Tabellenverzeichnis.....	viii
Abkürzungsverzeichnis .....	ix
Formelverzeichnis.....	xi
Symbolverzeichnis .....	xiii
Anlagenverzeichnis.....	xv
Inhaltsverzeichnis.....	xvi
<b>1. Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivation .....	1
1.2. Ziele und Struktur der Arbeit .....	7
<b>2. Theoretische Grundlagen .....</b>	<b>10</b>
2.1. Grundlagen von Verkehrssystemen.....	10
2.1.1. Systemtheoretische Grundlagen .....	10
2.1.2. Verkehrssysteme .....	12
2.1.3. Güterverkehrs- und Logistiksysteme.....	14
2.1.3.1. Logistik und Logistiksysteme .....	14
2.1.3.2. Güterverkehr und Güterverkehrssysteme.....	17
2.2. Analyse des deutschen Straßengüterverkehrssystems .....	20
2.2.1. Makroskopische Analyse .....	20
2.2.1.1. Logistikmarkt und Logistikbranche .....	20
2.2.1.2. Räumliche Niederlassungsmuster der Logistikbranche .....	26
2.2.2. Mikroskopische Analyse.....	30
2.2.2.1. Transportketten im Straßengüterverkehr.....	30
2.2.2.2. Typologie von Straßengüterverkehrsunternehmen.....	33
2.2.2.3. Netzwerkstrukturen des Straßengüterverkehrs.....	37
<b>3. Methodische Grundlagen.....</b>	<b>41</b>
3.1. Modellbildung .....	41
3.1.1. Grundlagen der Modellbildung.....	42
3.1.2. Klassifikation von Modellen.....	44
3.1.3. Optimierungsmodelle .....	48
3.1.3.1. Aufbau von Optimierungsmodellen.....	48
3.1.3.2. Vorgehen zur Bildung von Optimierungsmodellen .....	51
3.1.3.3. Klassifikation von Optimierungsmodellen.....	52

---

---

3.1.3.4. Lösungsverfahren für Optimierungsmodelle .....	54
3.1.4. Kopplung von Simulations- und Optimierungsmodellen .....	61
3.2. Planung von Verkehrssystemen.....	65
3.2.1. Planungsprozess für Verkehrssysteme .....	67
3.2.2. Wirkungsabschätzung im Rahmen des Verkehrsplanungsprozesses .....	71
3.2.2.1. Qualitative Methoden.....	74
3.2.2.2. Quantitative Methoden.....	75
3.2.3. Bewertung im Rahmen des Verkehrsplanungsprozesses .....	76
3.2.3.1. Nicht formalisierte Methoden.....	79
3.2.3.2. Teilformalisierte Methoden .....	80
3.2.3.3. Formalisierte Methoden .....	82
3.2.4. Modellbildung in der Verkehrsplanung .....	84
3.2.4.1. Verkehrsflussmodelle.....	84
3.2.4.2. Verkehrsnachfragemodelle.....	85
3.3. Bewertung des Reifegrades technischer Systeme.....	90
3.4. Zwischenfazit .....	92
3.4.1. Verkehrsplanungsprozess als Referenzrahmen.....	92
3.4.2. Wahl der Infrastruktur-Bewertungsmethode .....	93
<b>4. Systeme zur Energieversorgung des Elektroverkehrs während der Fahrt.....</b>	<b>94</b>
4.1. Systemklassifikation .....	94
4.2. Systeme zur Energieversorgung des Elektroverkehrs während der Fahrt.....	98
4.3. Konduktive Systeme .....	103
4.3.1. eHighway .....	103
4.3.1.1. Übersicht.....	103
4.3.1.2. Technischer Systemaufbau .....	104
4.3.1.3. Entwicklungsstand.....	105
4.3.2. Dynamic Charging System .....	109
4.3.2.1. Übersicht.....	109
4.3.2.2. Technischer Systemaufbau .....	109
4.3.2.3. Entwicklungsstand.....	110
4.3.3. Elonroad.....	112
4.3.3.1. Übersicht.....	112
4.3.3.2. Technischer Systemaufbau .....	112
4.3.3.3. Entwicklungsstand.....	113
4.4. Induktive Systeme .....	115
4.4.1. OLEV .....	115
4.4.1.1. Übersicht.....	115

---



---

4.4.1.2. Technischer Systemaufbau .....	115
4.4.1.3. Entwicklungsstand.....	117
4.5. Zwischenfazit .....	119
<b>5. Entwicklung eines simulationsbasierten Optimierungsverfahrens .....</b>	<b>121</b>
5.1. Beschreibung des zugrundeliegenden verkehrsplanerischen Entscheidungsproblems .....	121
5.2. Auswahl der Modellierungsmethode.....	123
5.2.1. Anforderungen an ein Lösungsverfahren.....	123
5.2.2. Begründung der Methodenauswahl.....	127
5.3. Überblick des Verfahrensablaufs .....	129
5.4. Verfahrensteil Infrastrukturbewertung .....	133
5.4.1. Begriffsbestimmungen .....	135
5.4.2. Methode zur Infrastrukturbewertung .....	137
5.4.2.1. Bewertungskriterien .....	140
5.4.2.2. Bewertung von Streckenelementen.....	144
5.4.2.3. Bewertung von Streckenabschnitten .....	147
5.5. Verfahrensteil Güterverkehrsnachfrage.....	151
5.6. Verfahrensteil Lageermittlung.....	152
5.6.1. Überblick.....	152
5.6.2. Ablauf eines Simulationsexperiments .....	156
5.6.2.1. Unterprozess Fahrt durchführen .....	158
5.6.2.2. Unterprozess Ladeoptionen prüfen .....	161
5.6.3. Optimierungskomponente .....	163
<b>6. Anwendungsbeispiel: eHighway in Deutschland .....</b>	<b>169</b>
6.1. Situation in Deutschland .....	170
6.2. Datengrundlage für das Anwendungsbeispiel.....	177
6.2.1. Güterverkehrsnachfrage.....	177
6.2.1.1. Vorgehen .....	178
6.2.1.2. Auswahl einer Relationsstichprobe .....	182
6.2.2. Fahrzeug- und Systemkonfiguration.....	183
6.2.3. Weitere Datenquellen .....	187
6.2.4. Anwendungsfallspezifische Annahmen.....	190
6.3. Modellanwendung.....	192
6.3.1. Referenzfall: Diesel-Lkw .....	193
6.3.2. Ergebnisse Szenario OH-Lkw 5 .....	197
6.3.3. Ergebnisse Szenario OH-Lkw 175.....	202
6.3.4. Ergebnisse Szenario OH-Lkw 300.....	205
6.3.5. Empfehlungen für Netzausbaukorridore .....	209
6.3.6. Einordnung der Modellergebnisse .....	212

---

---

<b>7. Schlussbetrachtung .....</b>	<b>214</b>
7.1. Zusammenfassung .....	214
7.2. Ausblick .....	217
7.2.1. Weiterer Forschungsbedarf .....	217
7.2.2. Politische Handlungsempfehlungen .....	221
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>223</b>
<b>Anhang 1: Übersicht Bewertungskriterien .....</b>	<b>xx</b>
<b>Anhang 2: Automatisierungsmöglichkeiten der Bewertung von Streckenelementen .....</b>	<b>xxiii</b>
<b>Anhang 3: Technische Umsetzung .....</b>	<b>xxvi</b>
<b>Anhang 4: Überblick Gesamtverfahren.....</b>	<b>xl</b>
<b>Anhang 5: Volkswirtschaftliches Systemoptimum .....</b>	<b>xli</b>



---

## 1. Einleitung

---

*In diesem Kapitel werden zunächst die zugrundeliegende Problemstellung und die Motivation zur Anfertigung dieser Arbeit dargestellt. Darauf aufbauend werden die Struktur der Arbeit und damit einhergehend die wissenschaftliche Methodik beschrieben.*

### 1.1. Motivation

#### Zunahme der Verkehrsnachfrage

Als einer der leistungsfähigsten Volkswirtschaften der Welt wird hinsichtlich der auf **deutschem Gebiet** erbrachten, jährlichen **Straßengüterverkehrsleistung** von einer **kontinuierlichen Zunahme** über die nächste Dekade ausgegangen. Die als Grundlage für die Bedarfsermittlung im Rahmen der Bundesverkehrswegeplanung dienende „*Prognose deutschlandweiter Verkehrsverflechtungen unter Berücksichtigung des Luftverkehrs*“, die im Auftrag des Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) erstellt wurde, weist zum Beispiel einen Anstieg der Straßengüterverkehrsleistung von ca. 437 Mrd. tkm im Basisjahr 2010 auf über 607 Mrd. tkm im Jahr 2030 aus, was einem Wachstum von 38,9% entspricht (Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur 2016). Mit Blick auf unterschiedliche **Transportentfernungs-Klassen** im Straßengüterverkehr wird sich dieser **Anstieg** vor allem auf den **Fern- bzw. Regionalverkehr** konzentrieren (Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur 2014). Die Verkehrsleistung wird also besonders im Segment der Transporte über eine Entfernung von mehr als 50 km zunehmen. In diesem Segment kommen vor allem schwere Nutzfahrzeuge mit einer zulässigen Gesamtmasse zwischen 25 und 40 Tonnen zum Einsatz (Kraftfahrt-Bundesamt 2015).

#### Begleitende Zunahme der Kohlenstoffdioxid- und Schadstoffemissionen

Sollte die Prognose zutreffend sein, hätte diese Entwicklung zur Folge, dass der **Anteil an den gesamtdeutschen Kohlenstoffdioxid-Emissionen** (CO<sub>2</sub>), der dem Straßengüterverkehr zurechenbar ist, ebenfalls weiter steigen würde. Der Grund dafür liegt in der **Abhängigkeit von fossilen Energieträgern**: der Straßengüterverkehr wird weitgehend mit Fahrzeugen abgewickelt, die mit Benzin- oder weit überwiegend mit Dieselmotoren ausgestattet sind (Kraftfahrt-Bundesamt 2017, S. 30). Das BMVI geht zwar in der Verflechtungsprognose für das Jahr 2030 von einem leichten Rückgang der güterverkehrsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus, es werden hier aber bereits die Umsetzung einer Reihe von Maßnahmen zur Effizienzsteigerung bei der Fahrzeugtechnik, bei der Transportabwicklung und bei der Förderung und Verbreitung alternativer Antriebssysteme unterstellt. Ob es realistisch ist, dass diese Maßnahmen mit entsprechenden finanziellen Mitteln unterlegt und so auch tatsächlich umgesetzt werden können, bleibt auf Grund der immer noch anhaltenden Minderallokation finanzieller Mittel in den Verkehrshaushalt indes offen (o. A. 2012).

Dem prognostizierten Wachstum der Straßengüterverkehrsleistung stehen die ambitionierten sog. **Klimaschutzziele** der Bundesregierung gegenüber (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit 2016a). Im *Aktionsprogramm Klimaschutz 2020*, das die Bundesregierung beschlossen hat, wird eine **Reduktion** der gesamtdeutschen **CO<sub>2</sub>-Emissionen** von etwa 1,25 Mrd. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten im Jahr 1990 **auf höchstens 0,75 Mrd. Tonnen** CO<sub>2</sub>-Äquivalenten im Jahr 2020 angestrebt (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit 2017a). Zu

---

diesem Ziel hat sich die Bundesrepublik Deutschland auch im Wege multilateraler Abkommen verpflichtet (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit 2016b).

Neben der Erreichung von Klimaschutzzielen rücken auch die **negativen Wirkungen** des **Straßengüterverkehrs** auf die **menschliche Gesundheit**, wie auch des Straßenverkehrs im Allgemeinen, in den Mittelpunkt einer gesellschaftlichen Debatte. **Lokale Emissionen von Schadstoffen** (z.B. Feinstäube oder Schwefel- und Stickoxide) stehen hier im Vordergrund. Konzepte zu deren Vermeidung sowie die Wirkungen des Verkehrs auf die menschliche Gesundheit werden daher zunehmend auch in der Verkehrsplanung aufgegriffen und entwickeln sich zu einem wichtigen Forschungs- und Handlungsfeld (Boltze 2013a).

### Alternativen zu Verbrennungsmotoren

Bezogen auf die Erreichung der **Klimaschutzziele** einerseits sowie die Vermeidung einer Gesundheitsbelastung durch den Straßengüterverkehr andererseits, müssen also **Alternativen zu Verbrennungsmotoren** gefunden werden, um das Spannungsfeld aus der steigenden Güterverkehrsleistung und den begleitenden negativen Umweltwirkungen zu überwinden.

Ein Lösungsansatz für dieses Problem liegt in der Weiterentwicklung von Antriebssystemen für Fahrzeuge, die nicht auf dem Einsatz fossiler Energieträger beruhen, was eine **Abkehr von der Verbrennungsmotor-Technologie** zur Folge hätte. Antriebssysteme auf Basis der Nutzung elektrischer Energie erscheinen, bezogen auf ihren Technologie-Reifegrad, bisher am weitesten entwickelt. Ein Großteil dieser Systeme, mit Ausnahme der Brennstoffzelle, hat systembedingt einen höheren Wirkungsgrad als ein Verbrennungsmotor (o. A. 2019a, S. 28ff). Gleichzeitig können die durch den Straßengüterverkehr verursachten, **direkten CO<sub>2</sub>- Emissionen teilweise oder komplett vermieden** werden.

Konzepte zur **Energieversorgung** dieser Elektrofahrzeuge beruhen derzeit vorwiegend auf dem Prinzip einer **stationären Ladung**: fahrzeugseitig verbaute, **elektrochemische Energiespeicher** (Akkumulatoren) werden an einer Ladestation über eine mehr oder weniger lange Zeit geladen, was vom Speichervermögen des verbauten Energiespeichers abhängt (Panchal *et al.* 2018). Systembedingt haftet dieser Form der Energieversorgung jedoch der **Nachteil** an, dass die notwendige **Energie im Fahrzeug selbst gespeichert bzw. während der Fahrt mitgeführt** werden muss. Somit ist die **Reichweite** der Fahrzeuge direkt **abhängig** von der **Größe** des im Fahrzeug verbauten **Energiespeichers**, wie dies auch bei fossilen Treibstoffen in Kombination mit Verbrennungsmotoren oder Brennstoffzellen-Fahrzeugen der Fall ist. **Technische Lösungen** für PKW sowie leichte Nutzfahrzeuge auf der einen Seite sowie LKW im Nahverkehr auf der anderen Seite weisen bereits einen hohen Technologie-Reifegrad auf. Eine Übertragung dieses Ansatzes auf **schwere LKW im Regional- und Fernverkehr** erscheint aber wegen des dann resultierenden, sehr hohen Gewichts des Energiespeichers vor dem Hintergrund des Forschungs- und Entwicklungsstandes der Technik **kaum geeignet**.

Für eine **typische Fernverkehrsfahrt** über eine Fahrtstrecke von 800 km müsste so z.B. bei einem durchschnittlichen Energieverbrauch von nur 1,5 kWh pro Kilometer ein Energiespeicher mit einem Speichervermögen von 1.700 kWh zur Verfügung stehen, wenn zur Schonung des Energiespeichers nur etwa 70 % der gespeicherten Energie in Anspruch genommen werden (Boltze 2019b). Für einen

---

---

Energiespeicher mit einer Energiedichte von 200 Wh/kg hat dies noch ein Eigengewicht des Energiespeichers von 8,5 Tonnen zur Folge. Bezogen auf die im Fernverkehr überwiegend zum Einsatz kommende Kombination aus Zugmaschine und Sattelaufleger mit mehr als vier Achsen und einer zulässigen Gesamtmasse von 40 Tonnen ergibt sich bei einer Zuladung von durchschnittlich 27 Tonnen eine Reduktion der möglichen Zuladung um ca. 31,5 % (Boltze 2019b). Somit würde aus Sicht der abwickelnden Transportunternehmen eine Beförderung derjenigen Sendungen **deutlich unwirtschaftlicher**, die ein Fahrzeug gewichtsmäßig aber nicht volumenmäßig auslasten.

Zudem wäre ein engmaschiges **Netzwerk von Ladestationen** notwendig, die auf privatem Grund z.B. an Handelslager- oder Logistikstandorten oder im öffentlichen Raum auf Autobahnraststätten oder -parkplätzen platziert werden müssten. Bei schonender Ladung, die auch für eine längere Lebensdauer des Energiespeichers sorgt, verlängern sich bei derart großen Energiespeichern die Ladezeiten und somit auch die (unproduktiven) Standzeiten. Daneben würden die weltweit noch vorhandenen **Reserven von Rohstoffen für elektrochemische Energiespeicher**, wie z.B. Lithium oder insbesondere das noch seltenere Kobalt, nicht ausreichen, die weltweite Nachfrage nach Elektrofahrzeugen und anderen Geräten mit entsprechenden Energiespeichern zu decken (Speirs *et al.* 2014; Ziemann 2018; Alaküla 2017; Nationale Plattform Elektromobilität 2018). Auch umfangreiche Innovationsschübe im Bereich der Lithium-Ionen-Technologie, die dafür sorgen würden, dass sich die Menge an benötigten Rohstoffen pro Volumeneinheit eines Energiespeichers erheblich verringern würde, bleiben abzuwarten (Zubi *et al.* 2018).

### **Lösungsansatz: Systeme zur Energieversorgung während der Fahrt**

Im Gegensatz zum Konzept der stationären Energieversorgung mit großen, fahrzeugseitig verbauten Energiespeichern ermöglichen sog. **Electric Road Systems (ERS)** die **Zuführung von Energie** und damit eine **Energieversorgung der Elektrofahrzeuge während der Fahrt**. Dadurch könnte, für den Fall einer auf Ebene des Gesamtnetzes durchgängig zur Verfügung stehenden Ladeinfrastruktur, vollständig auf die Mitführung eines fahrzeuginternen Energiespeichers verzichtet werden. Bei nicht durchgängig vorhandener Ladeinfrastruktur können in Abhängigkeit des Streckenausstattungsgrades die in den Fahrzeugen verbauten **Energiespeicher jedoch im Vergleich zu reinen „Batteriefahrzeugen“ kleiner dimensioniert werden**.<sup>1</sup>

Mit Blick auf den heutigen Entwicklungsstand der Technik kann wegen der kleineren und somit auch leichteren Energiespeicher die Reduktion der zur Verfügung stehenden Fahrzeug-Nutzlast bedingt durch den Einbau der Energiespeicher geringer ausfallen. Außerdem können, bezogen auf die Ausstattung der Straßenverkehrsinfrastruktur, diejenigen **Streckenabschnitte ausgespart werden**, die aus bautechnischer Sicht nur kostenintensiv auszustatten wären oder aus anderen Gründen nicht bebaut werden können.<sup>2</sup> Somit können in Konsequenz auch **Kostensenkungspotentiale** im Hinblick auf die **gesamten Kosten** zur flächendeckenden Einführung eines Systems ausgeschöpft werden. Zudem könnten bei entsprechend abgestimmter Auslegung der Energiespeicher der im Straßengüterverkehr oft

---

<sup>1</sup> Natürlich können auch sog. *Range Extender* (basierend auf fossilen Energieträgern) verwendet werden, auf deren Einbau sollte zumindest in einer fortgeschrittenen Phase des Netzausbaus aber aus den angeführten Gründen verzichtet werden.

<sup>2</sup> Bei einem oberleitungsgebundenen System könnten solche Streckenabschnitts-Eigenschaften z.B. nicht vorhandener Seitenraum oder Höheneinschränkungen durch Verkehrs- und Ingenieurbauwerke sein.

---

relativ kurze **Vor- und Nachlauf** zum übergeordneten Fernstraßennetz komplett **batterieelektrisch** abgewickelt werden.<sup>3</sup>

Systeme zur Energieversorgung des Elektroverkehrs während der Fahrt scheinen gemäß einer ersten Vergleichsstudie anderen alternativen Konzepten wie z.B. der Brennstoffzelle oder **Power-to-Fuel-Antrieben** überlegen (Wietschel *et al.* 2017). Die bisher vorliegenden wissenschaftlichen Erkenntnisse deuten ferner darauf hin, dass **Systeme zur Energieversorgung von schweren Nutzfahrzeugen während der Fahrt** auch den stationären Energieversorgungssystemen hinsichtlich des lebenszyklusbezogenen **Kosten-Nutzen-Verhältnisses** recht **deutlich überlegen** sind (Connolly 2016). Aus volkswirtschaftlicher Perspektive umfasst dies sowohl die Betriebs- und Investitions- als auch Umweltfolgekosten auf privater wie öffentlicher Seite. Aus diesem Grund werden stationäre Ladekonzepte sowie alternative Antriebskonzepte im weiteren Verlauf der Arbeit auch vernachlässigt und der Fokus auf die Systeme zur Energieversorgung während der Fahrt gelegt.

Zur **Weiterentwicklung** und zur **Bewertung der Praxistauglichkeit** von Systemen zur Energieversorgung von schweren Nutzfahrzeugen während der Fahrt fördern einige Staaten bereits Forschungs- und Entwicklungsprojekte. Darunter fallen z.B. auch Feldversuche in drei deutschen Bundesländern zur Erprobung des oberleitungsbasierten Systems *eHighway* auf den Bundesfernstraßen (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit 2017b). In Schweden existieren neben einer weiteren *eHighway*-Testanlage zudem noch einige Teststrecken für Systeme, die die Traktionsenergie aus einer in der Fahrbahn eingelassenen oder auf der Fahrbahn montierten Stromschiene entnehmen können (Alakula und Marquez-Fernandez 2017). Ferner hat das japanische Unternehmen Honda angekündigt, ein System mit seitlich im Mittelstreifen angebrachter Stromschiene erproben zu wollen (Tajima 2018). Eine staatliche Förderung für ein auf dem Induktionsprinzip beruhendes System läuft derzeit in Südkorea (Suh *et al.* 2011). Nach bisherigem Erkenntnisstand kann davon ausgegangen werden, dass diese **Systeme in einigen Jahren die Marktreife** erreichen werden und damit dann mehrere Alternativen zu den Systemen zur Verfügung stehen werden, die dem Prinzip einer stationären Energieversorgung folgen.

Im Zuge der Begleitung der **politischen Entscheidungsfindungsprozesse hinsichtlich der Einführung** eines oder mehrerer Systeme zur Energieversorgung von Lastkraftwagen während der Fahrt ergeben sich im Kern **drei interdependente, verkehrsplanerische Aufgabenstellungen**. Zum ersten stellt sich die **Frage nach demjenigen System** zur Energieversorgung während der Fahrt, das aus volkswirtschaftlicher das **beste Verhältnis** von **Kosten** und **Nutzen** aufweist. Hierzu sollten die entstehenden Investitions- und Betriebskosten, die unmittelbar vom Ausstattungsgrad des Straßenverkehrsnetzes abhängen, mit dem erwarteten gesellschaftlichen Nutzen in Beziehung gesetzt werden.

Für eine solche Nutzen-Kosten-Betrachtung ist daher im Zuge einer **zweiten verkehrsplanerischen Aufgabenstellung** zu ermitteln, **welche Teilstrecken des Autobahn- und Bundesstraßennetzes** mit entsprechenden Systemelementen **ausgestattet werden** sollten, um die vorhandene und für die Zukunft prognostizierte Güterverkehrsnachfrage möglichst umweltschonend bedienen zu können.<sup>4</sup> Da die für

---

<sup>3</sup> Vor- und Nachlauf bezeichnen diejenigen Teile einer Transportkette, die der Zu- bzw. Wegführung eines bestimmten Güteraufkommens zu demjenigen Transportmittel dienen, mit dem der größte Teil der Transportstrecke zurückgelegt wird. Dieser wird als Hauptlauf bezeichnet (Pfohl 2018, S. 152). Häufig werden in diesem Kontext auch die Begriffsbezeichnungen „First Mile“ bzw. der „Last Mile“ verwendet.

<sup>4</sup> Als Teilstrecke wird im Rahmen dieser Arbeit ein Abschnitt des deutschen Autobahnnetzes bezeichnet, der eine festgelegte Netzverbindung zwischen zwei Netznoten darstellt.

---



---

eine nachfragegerechte Netzausstattung notwendigen Haushaltsmittel mit Blick auf die andauernde Unterfinanzierung der Straßenverkehrsinfrastruktur aller Voraussicht nach wohl nicht zur Verfügung stehen werden, ergibt sich unmittelbar auch die Notwendigkeit der Priorisierung **der zu tätigenen Investitionen** in ein dann entstehendes Vorrang-Ausbaunetz (o. A. 2012; Wieland 2016; Wieland 2010; Kopper *et al.* 2013).

Im Zusammenhang mit der Ermittlung eines solchen Ausbaunetzes ergibt sich als dritte verkehrsplanerische Aufgabenstellung die Frage nach der **konstruktiv-bautechnischen Bewertung** bezogen auf einzelne Elemente des Straßenverkehrsnetzes hinsichtlich ihrer Ausstattungsfähigkeit. Einige bautechnische Eigenschaften von Streckenelementen oder ganzen Teilstrecken des Straßenverkehrsnetzes sorgen dafür, dass sie nicht mit bestimmten technischen Komponenten der Energieversorgungssysteme ausgestattet werden können oder aber eine Ausstattung nur mit überproportional hohen Kosten möglich wäre. Ein prägnantes Beispiel stellen Ingenieurbauwerke wie längere Tunnel oder Talbrücken im Hinblick auf eine Ausstattung mit Oberleitungen dar. Eine solche **Bewertung der baulichen Machbarkeit** kann bei der Ableitung von Ausbau-Netzkonfigurationen berücksichtigt werden.

Für den Planungsraum Deutschland wurden in der jüngeren Vergangenheit bereits vereinzelt Arbeiten im Zusammenhang mit dieser Thematik publiziert, insbesondere zur Ableitung einer Netzkonfiguration in Bezug auf ein konkretes Anwendungsbeispiel mit Unterstellung eines Vollausbaus des Fernstraßennetzes (Jöhrens *et al.* 2020; Hacker *et al.* 2020). Weil aus methodischer Sicht aber bisher kein Verfahren existiert, das die integrierte Bearbeitung der drei aufgeworfenen verkehrsplanerischen Aufgabenstellungen ermöglicht, adressiert die vorliegende Arbeit diesen **Forschungsbedarf**.

Aus diesem Grund wird im Verlauf dieser Arbeit ein dreistufig-modulares, **simulationsbasiertes Optimierungsverfahren** entwickelt, das die **Ableitung eines nachfragegerechten Streckenausstattungsgrads** deutscher Autobahnen ermöglicht. Dieses Verfahren, das für verschiedene Energieversorgungssysteme und unabhängig von einem konkreten Planungsraum eingesetzt werden kann, schafft damit einerseits eine Möglichkeit zur **Ableitung und Bewertung verschiedener Netzwerkkonfigurationen eines bestimmten Systems**. Dabei können zum einen die bauliche Machbarkeit und zum anderen verschiedene Kapazitäten von Energiespeichern in den Fahrzeugen berücksichtigt werden.

Andererseits kann das entwickelte Verfahren angewendet werden, um für **verschiedene Systeme** zur Energieversorgung des Elektroverkehrs während der Fahrt eine bestmögliche **Netzkonfiguration** abzuleiten. Somit können aus der Anwendung des Verfahrens wichtige **Eingangsdaten und Erkenntnisse** für eine sich anschließende, **vergleichende Bewertung** der Systeme **auf volkswirtschaftlicher Ebene** gewonnen werden. Auch hierbei fließen die bauliche Machbarkeit sowie verschiedene Energiespeicher-Kapazitäten ein.

Diese Arbeit soll außerdem einen Beitrag dazu leisten, einen möglichen **Pfad aus der Abhängigkeit** des Straßengüterverkehrs von der Technologie der Verbrennungsmotore in Deutschland zu identifizieren und eine Informationsgrundlage für eine möglichst breite öffentlich-gesellschaftliche Debatte zu schaffen. Hierzu werden für die in **Deutschland** aufkeimende, öffentlich-gesellschaftliche Debatte neue **Erkenntnisse** im Rahmen eines **modellbasierten Anwendungsbeispiels** abgeleitet. Dieses Anwendungsbeispiel ist das oberleitungsgebundene **eHighway-System** auf deutschen **Autobahnen**.



---

Durch eine Abkehr des Straßengüterverkehrs von der Technologie der Verbrennungsmotoren können auch die **negativen Auswirkungen des Straßengüterverkehrs auf den Menschen und die Umwelt gemindert** und dadurch die **gesellschaftliche Akzeptanz des Straßengüterverkehrs** als wichtigem Pfeiler der deutschen Wirtschaftsleistung wieder **gesteigert werden**. Zu diesem übergeordneten Ziel soll diese Arbeit ebenfalls einen kleinen Beitrag leisten.

---

## 1.2. Ziele und Struktur der Arbeit

Mit Blick auf den identifizierten Forschungsbedarf bzw. die drei beschriebenen verkehrsplanerischen Aufgabenstellungen ist es das **oberste Ziel** dieser Arbeit, ein simulationsbasiertes Verfahren zur Optimierung der Ausstattung deutscher Autobahnen mit Systemen zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt zu entwickeln. Durch die Anwendung des entwickelten Verfahrens auf ein konkretes Fallbeispiel für den Planungsraum der deutschen Autobahnen soll diese Arbeit neben dem beschriebenen, methodischen Beitrag auch **praxisrelevante Erkenntnisse** gewinnen.

In Abgrenzung zum Stand der Forschung soll dieses Verfahren dann die Möglichkeit bieten, eine bedarfsgerechte und bestenfalls auch im mathematischen Sinne **optimale Netzkonfigurationen** für beliebige Systeme zur Energieversorgung von Lastkraftwagen während der Fahrt und unterschiedliche Planungsräume zu ermitteln. Hierbei soll auch die bauliche Machbarkeit einer Streckenausstattung berücksichtigt werden, wozu ein eigenständiger Verfahrensteil entwickelt wird. Zudem soll das Verfahren auch für verschiedenartig aggregierte Datengrundlagen zur Verkehrsnachfrage geeignet sein.

Das entwickelte Verfahren soll einen Beitrag dazu leisten, die **Voraussetzungen** für eine **vergleichende, volkswirtschaftliche Bewertung verschiedener Systeme** zur Energieversorgung des Elektroverkehrs während der Fahrt für das deutsche Autobahnnetz zu schaffen. Damit eignet sich das Verfahren zum Beispiel auch für einen Einsatz im Rahmen eines Verkehrsplanungsprozesses auf gesamtdeutscher Ebene. Der Gang der Untersuchung sowie die daraus abgeleitete Gliederung dieser Arbeit sind schematisch in Abbildung 1-1 dargestellt.

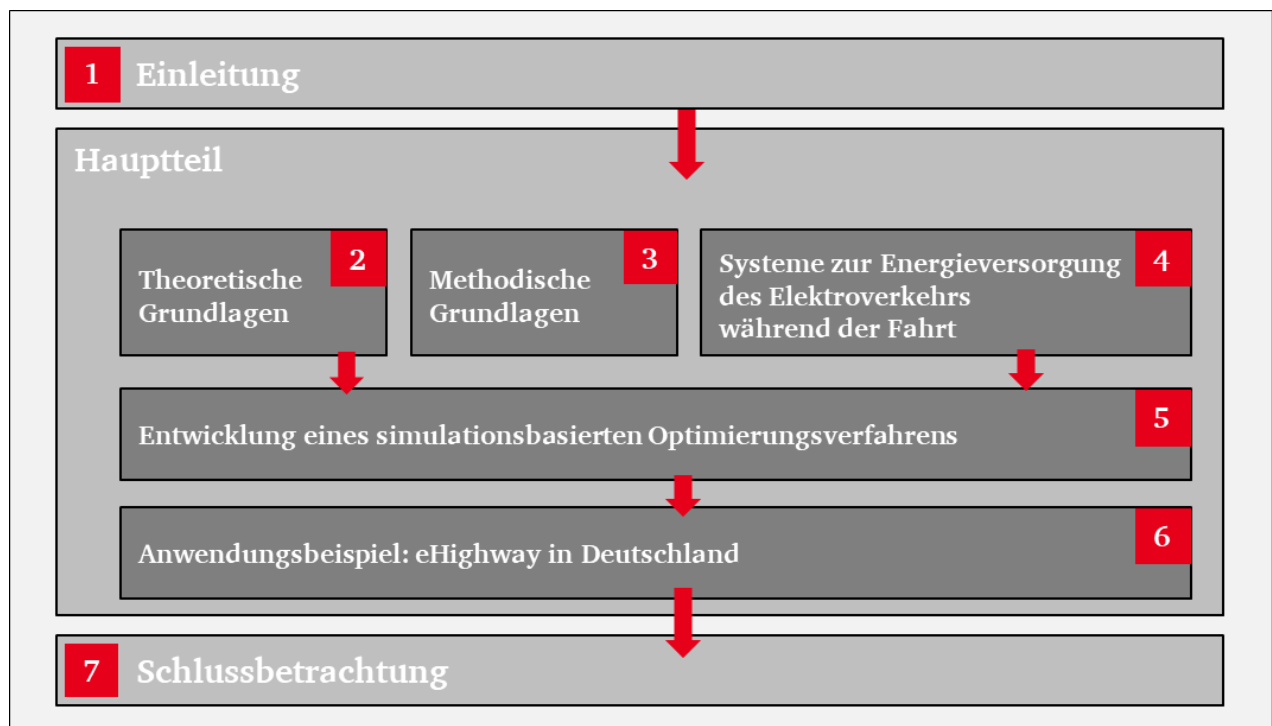


Abbildung 1-1: Struktur der Arbeit und Gang der Untersuchung  
(Quelle: eigene Darstellung).

---

Zunächst werden nach diesem ersten, einleitenden Kapitel im nachfolgenden **Kapitel 2** die notwendigen **theoretischen Grundlagen** im Wege einer Literaturanalyse dargelegt. Hierfür werden zunächst **Verkehrssysteme** im Allgemeinen aus einer **systemtheoretischen Sicht** charakterisiert, um dann im Speziellen auf **Güterverkehrs- und Logistiksysteme** sowie deren Eigenschaften einzugehen. Dies ist notwendig, weil im Untersuchungsverlauf immer wieder auf solche Systeme Bezug genommen werden wird. Auf dieser Basis wird anschließend im Rahmen einer **Systemanalyse** das deutsche Straßengüterverkehrssystem beschrieben, um hieraus Erkenntnisse für die weiteren Arbeitsschritte abzuleiten. Auch auf diese Ergebnisse wird im weiteren Verlauf der Untersuchung an verschiedenen Stellen abgestellt werden.

Daran anknüpfend werden in **Kapitel 3 wissenschaftliche Methoden** beschrieben, die im weiteren Verlauf der Untersuchung erwähnt oder verwendet werden. So wird zunächst der **Planungsprozess für Verkehrssysteme** als methodischer Bezugsrahmen beschrieben. In diesem Zusammenhang wird außerdem auf **Methoden zur Wirkungsabschätzung und zur Bewertung** verkehrsplanerischer Handlungskonzepte im Rahmen des Verkehrsplanungsprozesses eingegangen. Eine in Wissenschaft und Praxis weit verbreitete Methode zur Ermittlung der Wirkungen dieser Handlungskonzepte stellt die Modellbildung dar. Aus diesem Grund werden zunächst allgemeine **Grundlagen der Modellbildung** beschrieben, um dann im Besonderen auf die Modellklassen der **Simulations- und Optimierungsmodelle** einzugehen. Abschließend wird, in Vorbereitung auf die Ausführungen in Kapitel 4, eine Methode zur **Bewertung des Reifegrads technischer Systeme** vorgestellt.

In **Kapitel 4** wird dann mittels einer **Literaturanalyse** der **Entwicklungsstand** der **Systeme zur Energieversorgung des Elektroverkehrs während der Fahrt** wiedergegeben. Hierzu werden zunächst verschiedene Formen der Energieübertragung und der Energieversorgung des Elektroverkehrs beschrieben und es wird darauf aufbauend eine **Systematik zur Klassifikation** solcher Systeme vorgeschlagen. Unter Nutzung der vorgeschlagenen Klassifikation werden dann beispielhaft einige **Systeme in ihrem Aufbau** beschrieben sowie der **Prozess deren technischer Entwicklung** nachvollzogen, um dann den bei Verfassung dieser Arbeit erreichten **Reifegrad** eines jeden Systems einschätzen zu können.

Die Ermittlung einer optimalen Netzausstattung mit Systemen zur Energieversorgung während der Fahrt lässt sich aus einem theoretisch-methodischen Blickwinkel als ein Problem auffassen, das prinzipiell mit den Methoden der mathematischen Optimierung gelöst werden kann. Nur für einige Gruppen dieser Modelle können aber im mathematischen Sinne optimale Lösungen in polynomialer Laufzeit generiert werden. Ohne Vorwegnahme der späteren Argumentationskette kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass das zugrundeliegende reale Problem ohne restriktive Vereinfachungen nicht für realistische Instanzen mit solchen Verfahren gelöst werden kann. Aus diesem Grund wird in **Kapitel 5** ein **heuristisches, simulationsbasiertes Optimierungsverfahren** vorgestellt.<sup>5</sup> Dieses Verfahren leitet auf Basis realistischer Fahrtverläufe von schweren Nutzfahrzeugen im Straßengüterverkehr ein entsprechendes, räumliches Verteilungsmuster von Ladestationen entlang des Verkehrsnetzes ab. Dabei können auch lokale infrastrukturelle Einflussfaktoren berücksichtigt werden, um eine bauliche Machbarkeitsbewertung modellseitig zu abzubilden.

---

<sup>5</sup> Heuristiken sollen möglichst gute Lösungen für Optimierungsmodelle finden, können dies aber nur für einige Modellgruppen garantieren (Suhl und Mellouli 2013, S. 13).

---

---

Um neben diesem methodischen Beitrag zum wissenschaftlichen Erkenntnisfortschritt auch praxisrelevante Erkenntnisse ableiten zu können, wird das entwickelte Verfahren dann auf das **Fallbeispiel eHighway** in Deutschland angewendet, was in **Kapitel 6** dokumentiert wird. Das *eHighway*-System beruht zur Energieversorgung schwerer Nutzfahrzeuge auf der Kombination eines fahrzeugseitig verbauten Pantographen mit einer Oberleitung entlang des Straßenkörpers (siehe Abschnitt 4.3.1). Nach einer Beschreibung der dazu verwendeten **Datengrundlage** werden **Szenarien** für die Anwendung des Verfahrens definiert. Ein solches Szenario bildet eine bestimmte Kombination aus Ladestations- und Fahrzeugkonfiguration ab. Daran anknüpfend wird die **Anwendung des Verfahrens** dokumentiert, und die Ergebnisse mitsamt entsprechenden **Sensitivitätsanalysen** werden beschrieben. Abschließend werden die Modellergebnisse an themenbezogenen **Veröffentlichungen** gespiegelt.

Zuletzt wird der Gang der Untersuchung in **Kapitel 7** im Wege einer **Schlussbetrachtung** zusammengefasst, und die **wichtigsten Erkenntnisse** werden zusammenfassend herausgestellt. Abgeschlossen wird die Arbeit mit einem **Ausblick**. Hierbei wird zum einen auf **weiteren Forschungsbedarf** eingegangen, um möglicherweise den Anstoß für weitere Untersuchungen zu geben. Zudem werden einige **politische Handlungsempfehlungen** in Bezug auf die Ausstattung deutscher Fernstraßen mit Systemen zur Energieversorgung von Lastkraftwagen während der Fahrt formuliert.

---

## 2. Theoretische Grundlagen

---

*In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen dargestellt, die zum weiteren Verständnis des Untersuchungsverlaufs notwendig sind. Zunächst werden Verkehrssysteme als zentraler Analysegegenstand dieser Arbeit eingeführt und in ihren Grundzügen charakterisiert. Darauf aufbauend wird auf verständnisrelevante Aspekte bzw. Elemente des deutschen Straßengüterverkehrssystems im Wege einer kurzen Systemanalyse eingegangen.*

### 2.1. Grundlagen von Verkehrssystemen

Unter dem Begriff **Verkehr** wird im Sinne dieser Arbeit die Gesamtheit der aktiv durchgeführten Ortsveränderungen von Personen und Gütern verstanden (Pirath 1949, S. 3). Frühe Definitionen des Begriffs stellen noch auf die Ortsveränderungen von Nachrichten bzw. Energie als Teil des Verkehrs ab, allerdings stehen diese bereits seit einigen Dekaden nicht mehr im Fokus der Verkehrswissenschaft, sondern fallen den Disziplinen Nachrichten- und Energietechnik als Erkenntnisgegenstand zu.

In der Regel ist Verkehr **Mittel zum Zweck**: Ortsveränderungen von Gütern werden durchgeführt, um räumliche Distanzen, bedingt durch eine arbeitsteilige und disperse Wirtschafts- und Siedlungsstruktur, zu überwinden (Beckmann 2014, S. 2097). Diese Ortsveränderungen werden unter **Nutzung** entsprechender **Verkehrsanlagen** durchgeführt, die in Verbindung mit weiteren Elementen als Systeme aufgefasst werden können. Aus diesem Grund wird in diesem Abschnitt zunächst die **Systemtheorie** als ein **bedeutsamer wissenschaftlicher Bezugsrahmen** in der Verkehrswissenschaft dargestellt. Darauf aufbauend werden **Verkehrssysteme** und deren Bestandteile im Allgemeinen beschrieben, sowie die **Güterverkehrssysteme** im Besonderen von den **Logistiksystemen** begrifflich abgegrenzt.

#### 2.1.1. Systemtheoretische Grundlagen

Als wissenschaftstheoretischer **Bezugs- und Analyserahmen** hat sich in den Ingenieurwissenschaften im Allgemeinen und den Verkehrswissenschaften im Besonderen die Systemtheorie etabliert (Cascetta, 2009). Zentraler Erkenntnisgegenstand und Namensgeber dieser Theorie ist das **System**. *Ein System besteht aus einem oder mehreren strukturell verbundenen Elementen, deren Zustände von anderen Elementen (oder sich selbst) abhängen und die die Zustände anderer Elemente (oder sich selbst) beeinflussen* (Bossel 1989, S. 9). Die einzelnen Systemelemente können (gedanklich) nicht weiter zerlegt werden, ein System kann jedoch auch aus Subsystemen zusammengesetzt sein, die wiederum aus einzelnen Elementen bestehen (Gillenkirch 2018).

*„Ein System ist durch seinen Systemzweck (Funktion), seine Systemelemente und Wirkungsverknüpfungen (Wirkungsstruktur) und seine Systemintegrität gekennzeichnet.“* (Bossel 2004). Ein System weist also sowohl **Elemente** als auch eine **inhärente Struktur** auf, die beide notwendige Bestandteile eines Systems sind. Zudem dient ein System immer einem bestimmten **Zweck** bzw. ein solcher Zweck kann ihm zugeschrieben werden. In diesem Sinne ist ein System also eine aufgaben-, sinn- oder zweckgebundene Einheit (Ropohl 2012). Ein System ist aus Sicht eines außenstehenden Beobachters durch bestimmte **Kenngroßen oder –zustände** beschreibbar, die er beobachten oder messen kann und die für ihn von Interesse sind.

---

Ein **System** kann somit auch klar von seiner umgebenden **Umwelt** **abgegrenzt** werden. Wenn ein System über diese Systemgrenzen hinweg im Austausch mit der Systemumwelt steht bzw. Schnittstellen dazu existieren, wird das System als **offen**, andernfalls als **geschlossen** bezeichnet. Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 2-1 dargestellt.

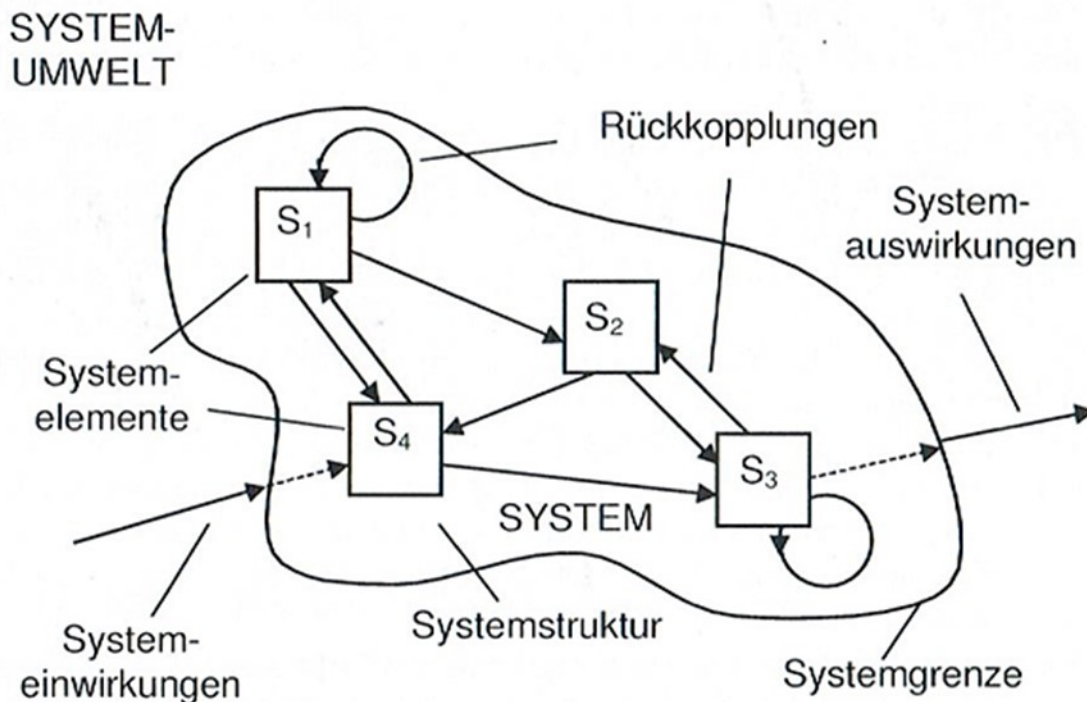


Abbildung 2-1: System, Systemumwelt und Elemente  
(Quelle: Bossel 2004, S. 36)

Einige Systeme weisen eine Reihe von Eigenschaften auf, die dazu führen, dass sie als **komplex** klassifiziert werden. Komplexität in diesem Kontext meint „...die Vielfalt der Verhaltensmöglichkeiten der Elemente...“ und deren Veränderlichkeit über den Zeitverlauf (Fees 2018).<sup>6</sup> Der **Komplexitätsgrad** eines Systems ist von der **Anzahl und der Art der Elemente** sowie der **Anzahl und der Intensität der Beziehungen der Elemente** untereinander abhängig. Mit Blick auf ein beliebiges System steigt dessen systemimmanenter Komplexitätsgrad mit der Anzahl der Systemelemente und der Beziehungen untereinander. Zwei charakterisierende Merkmale komplexer Systeme sind zum einen deren **Intransparenz** für externe Beobachter: sie haben i.d.R. keine Möglichkeit, die systemimmanente Wirkungsstruktur intuitiv zu erfassen. Zum anderen besteht zumeist **keine Möglichkeit einer exakten Modellierung** bzw. Nachbildung eines komplexen Systems. Diese Eigenschaft erschwert genaue Vorhersagen bestimmter zukünftiger Systemzustände oder Prognosen zu Ausprägungen von Systemkenngrößen. Komplexität in diesem Sinne tritt besonders bei sozioökonomischen oder technischen Systemen wie z.B. Verkehrssystemen auf.

<sup>6</sup> Eine allgemeingültige, disziplinübergreifende Definition des Komplexitätsbegriffes existiert bisher nicht. Insbesondere der Komplexitätsbegriff in der Informatik ist von dem hier beschriebenen Verständnis der Komplexität zu unterscheiden, dort beschreibt er den Ressourcenverbrauch algorithmischer Strukturen im Verhältnis zur Problemgröße bzw. zum Umfang der zu verarbeitenden Datengrundlage (Wegener 2003).

---

Häufig sind komplexe Systeme auch **adaptiv**: adaptive Systeme können sich einer sich verändernden Systemumwelt anpassen und weisen ein hohes Maß an immanenter Lernfähigkeit auf. (Stüttgen 2002). Daher werden sie auch als **komplex-adaptive Systeme** oder engl. *Complex Adaptive Systems* (Akronym: CAS) bezeichnet. Der Umgang mit komplex-adaptiven Systemen erfordert ein hohes Maß an Wissen über die Wirkungszusammenhänge zwischen den Systemelementen. Daneben ist es beim Umgang mit CAS häufig notwendig, **die Systemstruktur** und somit das Wirkungsgefüge innerhalb des Systems **auf wenige Merkmale und kausale Muster reduzieren** zu können.

Um solche Systeme beschreiben, analysieren und beeinflussen zu können, hat sich im Kontext der Systemtheorie bzw. unter dem Paradigma des **Systemdenkens** oder **Systems Thinking** ein breites Spektrum wissenschaftlicher Methoden etabliert. Ziel des Einsatzes dieser Methoden ist es, die Einsicht in Prozesse, Strukturen und Entscheidungsoptionen in Bezug auf komplex-adaptive Systeme zu verbessern (Schaub, 2007). In diesem Zusammenhang ist es das Ziel von **Systemanalysen**, wie sie z.B. in Kapitel 2.2 durchgeführt wird, ein bestehendes System zu beschreiben, um es dann zu verändern, zu verbessern oder zu dokumentieren (Heinrich 2007, S. 3 oder Häuslein 2004). Hierbei wird also versucht, mittels einer **Analyse der Systemstruktur** und beobachteter **Systemkenngrößen Rückschlüsse auf die Wirkungszusammenhänge** innerhalb des Systems ziehen zu können. Eine solche Beschreibung eines Systems hat **vorbereitenden Charakter** für jeden Versuch einer **Modellbildung**, bei der das Erfassen einer in der Realität vorkommenden Problemsituation der erste Arbeitsschritt ist (Suhl und Mellouli 2013, S. 7).

### 2.1.2. Verkehrssysteme

Die Mehrheit der **Verkehrssysteme** können als Beispiele für **offene, komplex-adaptive Systeme** aufgefasst werden. In einem engeren, ursprünglichen Sinne umfasst ein Verkehrssystem lediglich die jeweiligen Anlagen der Verkehrsinfrastruktur (z.B. Straßen, Ingenieurbauwerke, Knotenpunkte etc.) einschließlich aller Elemente zur Abwicklung von Verkehrsströmen auf den Verkehrsanlagen wie z.B. die systemspezifische Leit-, Sicherungs- und Betriebstechnik (Kirchhoff 2002, S. 97). Mit einhergehenden Planungs-Paradigmenwechseln wurden jedoch auch die den Verkehr verursachenden Aktivitäten von Menschen und Unternehmen in den Betrachtungs- und Analyserahmen einbezogen, auch wenn diese streng genommen nicht Elemente von Verkehrssystemen sind (Meyer 2016).

Gemäß neueren Definitionen umfasst ein Verkehrssystem einerseits die jeweiligen **Verkehrsanlagen** einschließlich aller **notwendigen Verkehrsmittel** sowie die mit den entstehenden Verkehrsströmen bzw. Transportprozessen verbundene **Betriebs-, Sicherungs- und Leittechnik**. Andererseits werden auch die den Verkehr verursachenden **Aktivitätenmuster** bzw. die transportierten Personen und Güter (als sog. **Verkehrsobjekte**) in den Betrachtungsrahmen der Verkehrssystemanalyse einbezogen (Cascetta 2009, S. 1-5). Diesen Zusammenhang verdeutlicht Abbildung 2-2 auf der folgenden Seite grafisch.

---



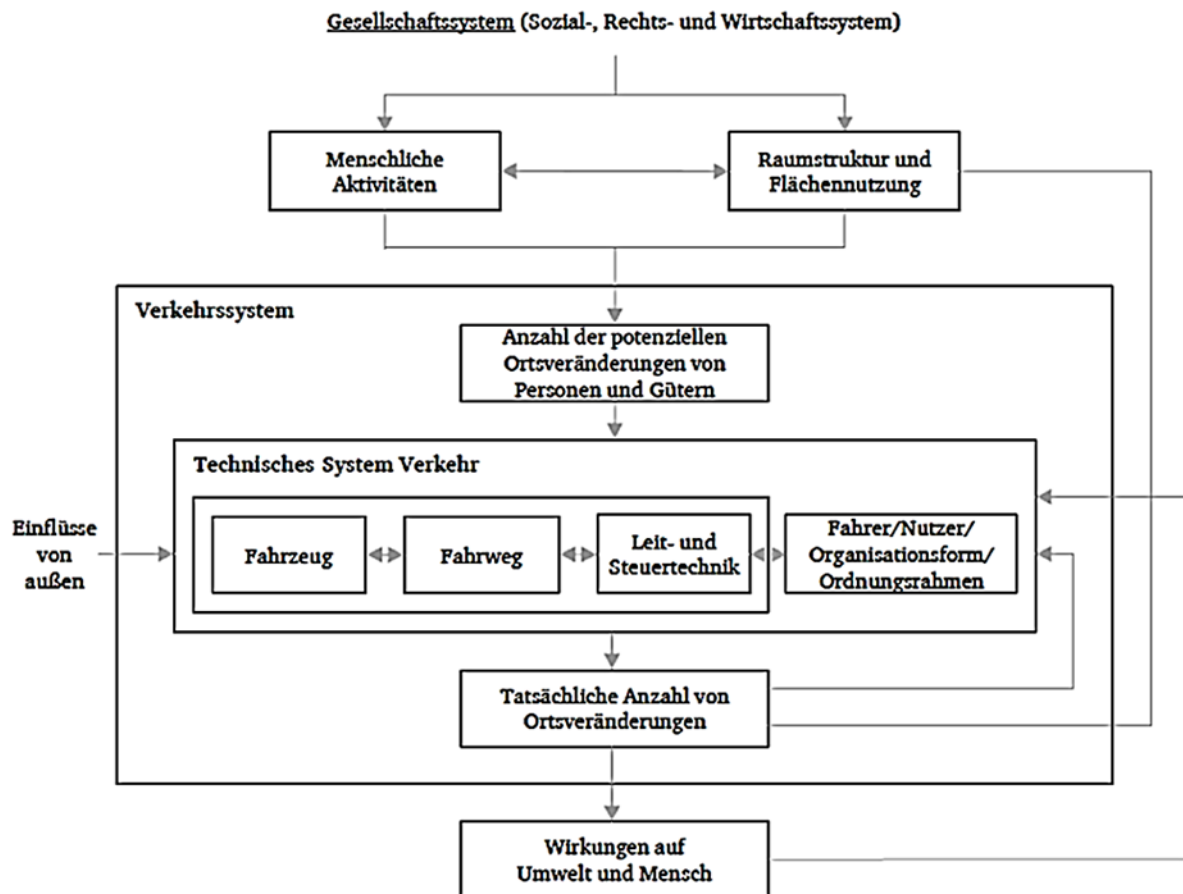


Abbildung 2-2: Verkehrssysteme und ihre Einbettung in das Gesellschaftssystem  
(Quelle: Köhler 2014, S. 18).

Die **Struktur eines Untersuchungsraums** ergibt sich als Resultat aus den vergangenen und gegenwärtigen Entscheidungen von Individuen und Unternehmen zur Flächennutzung. Im **Zusammenwirken** aus Raumstruktur und den **menschlichen Aktivitätenmustern** entsteht die **Anzahl potentieller Ortsveränderungen** von Personen und Gütern, was als **Verkehrsbedarf** bezeichnet wird (Kirchhoff 2002, S. 72). In diesen **menschlichen Aktivitätenmustern** ist auch explizit das Handeln von Unternehmen eingeschlossen, da das Verhalten von Unternehmen letztlich durch Individuen gesteuert wird.

Aus verschiedenen Gründen wird nicht jeder Verkehrsbedarf auch tatsächlich realisiert. Die **Anzahl der tatsächlich realisierten Ortsveränderungen** von Menschen und Gütern zwischen zwei Verkehrszellen bezogen auf einen abgegrenzten Untersuchungsraum wird als **Verkehrsnachfrage** bezeichnet (Baudach *et al.* 2013, S. 383). Zur Realisierung der Ortsveränderungen werden technische Systeme (bestehend aus Fahrzeugen, Fahrwegen sowie entsprechender Leit- und Steuerungs- bzw. Sicherungstechnik) genutzt, die in ihrer Gesamtheit als **Verkehrsangebot** bezeichnet werden. Die **Verkehrsnachfrage** als Mengenphänomen **wirkt** wiederum **auf die Menschen und die Umwelt** bzw. auf das gesamte Gesellschaftssystem. Zudem unterliegen **Verkehrssysteme äußeren Einflüssen**, die sich auf die **einzelnen Systemelemente** als auch das ganze System auswirken. Die isolierte Betrachtung eines Verkehrssystems und damit die Vernachlässigung der Systemumgebung kann zu fehlerhaften Schlussfolgerungen hinsichtlich zukünftiger Systemzustände führen (Ammoser und Hoppe, 2006).



---

Wie andere Systeme auch, sind Verkehrssysteme durch die **Menge ihrer Elemente** und die **zwischen den Elementen bestehenden Beziehungen** beschreibbar (Ammoser und Hoppe, 2006). **Verkehrssysteme** können daher je nach Untersuchungsgegenstand anhand bestimmter Merkmale oder Eigenschaften aus der Gesamtheit aller im Verkehrswesen vorhandenen Systemelemente als **Subsysteme abgegrenzt werden**. Diese abgegrenzten Subsysteme können einen einzelnen Verkehrsträger umfassen (z.B. Straßen-, Eisenbahn-, Wasser-, Rohrleitungs- oder Luftverkehr). Sie können aber auch so abgegrenzt werden, dass sie nur einen Teil eines Verkehrsträgers (z.B. Schienenpersonenverkehr, Straßengüterverkehr) oder auch mehrere Verkehrsträger (z.B. Kombinierte Verkehr) umfassen.<sup>7</sup> Daneben werden Verkehrssysteme häufig auch **nach Verkehrs- oder Transportobjekt** (z.B. Personen- oder Güterverkehr) unterschieden (Aberle 2009, S. 18-20).

Von besonderem Interesse für diese Arbeit sind **Güterverkehrssysteme**, im Besonderen das Straßengüterverkehrssystem, worauf im folgenden Abschnitt genauer eingegangen wird.

### 2.1.3. Güterverkehrs- und Logistiksysteme

Häufig werden die Begriffe *Güterverkehr* und *Logistik* insbesondere in fachfremden Kreisen synonym verwendet, was jedoch irreführend ist. In diesem Abschnitt werden daher zunächst beide Begriffe **voneinander abgegrenzt**. Danach wird kurz auf die **Unterschiede** und **Gemeinsamkeiten** von Güterverkehrs- und Logistiksystemen eingegangen und ihre **Beziehung** in Bezug zu Verkehrssystemen bzw. zur **Entstehung der Verkehrsnachfrage** wird untersucht.

#### 2.1.3.1. Logistik und Logistiksysteme

Die Begriffsbezeichnung **Logistik** geht auf die Ausführungen des Generals Antoine-Henri de Jomini zurück, der sowohl in den Diensten des französischen Kaisers Napoleons I. als auch des russischen Zaren stand und als wichtiger Militärtheoretiker gilt (Kummer *et al.* 2011, S. 16). Der Ursprung der Logistik liegt also in der Militärlogistik und wurde daher in seiner heutigen Form maßgeblich durch die alliierten Streitkräfte während des Zweiten Weltkriegs geprägt, die in diesem Zusammenhang auch den Grundstein für das Operations Research (OR) als wissenschaftliche Disziplin gelegt haben (Zimmermann 2008, S. 6ff; Schwenkert und Stry 2015, S. 3ff).

Noch heute wird die **Begriffsbezeichnung Logistik mehrdeutig verwendet**. Einerseits meint Logistik die „...wissenschaftliche Lehre von der Planung, Steuerung und Optimierung der Material-, Personen-, Energie- und Informationsflüsse in Systemen, Netzen und Prozessen.“ (Hompel und Heidenblut 2011, S. 185). Diese Definition zielt also auf die Logistik als eigene **Forschungsdisziplin** ab und ist überdies akademisch immer noch umstritten (Göpfert 2013). Andererseits ist Logistik auch eine **Branchenbezeichnung** „...die alle Unternehmen bzw. Unternehmensteile bezeichnet, die logistische Dienstleistungen erbringen.“ (Hompel und Heidenblut 2011, S. 185). Somit kann die Benutzung der Begriffsbezeichnung Logistik missverständlich sein, weil Raum zur Interpretation in Bezug auf den Kontext der Begriffsverwendung besteht. Daher wird der unmissverständliche Begriff **Logistikbranche**

---

<sup>7</sup> Insbesondere die in der Umgangssprache häufig anzutreffende, synonyme Verwendung der Begriffe *Verkehrssystem*, *Verkehrszweig* bzw. *Verkehrsträger* kann daher verwirrend sein und sollte vermieden werden.

---

---

als Bezeichnung des **Wirtschaftszweigs** in dieser Arbeit durchgehend verwendet während die Bezeichnung **Logistik** auf die **wissenschaftliche Disziplin** abstellt.

**Logistiksysteme** sind „...Systeme zur raumzeitlichen Gütertransformation...“ und dienen damit der Raum- bzw. Zeitüberbrückung (Pfohl 2018, S. 4). Innerhalb von Logistiksystemen vollziehen sich dazu **logistische Kernprozesse** wie *Transport, Umschlag* und *Lagerung*. Zudem werden weitere, mit den Kernprozessen **verbundene Leistungen** erbracht, die in ihrer Gesamtheit als **Logistikprozesse** bezeichnet werden (Fleischmann 2008, S. 5). **Transportprozesse**, als wichtigstem Element von Logistiksystemen aus Sicht dieser Arbeit, haben die „...Raumüberbrückung oder Ortsveränderung von Transportgütern mit Hilfe von Transportmitteln“ zur Aufgabe während **Lagerprozesse** der Zeitüberbrückung dienen (Pfohl 2018, S. 7). **Umschlagprozesse** umfassen sowohl „...das Handhaben der Güter, z.B. bei der Einlagerung von Gütern in ein Regal, das Zusammenfassen oder Auflösen von Gütern, z.B. im Zusammenhang mit Paletten, als auch das Sortieren der Güter im Rahmen der Kommissionierung“ (ebenda, S. 8). Durch Umschlag- und Lager- insbesondere aber durch Transportprozesse in Logistiksystemen werden Güterflüsse hervorgerufen, die die **volkswirtschaftlichen Sektoren** der **Güterbereitstellung** und der **Güterverwendung** miteinander verbinden und als Fahrzeugströme eine wesentliche Mess- und Kenngröße für Verkehrssysteme darstellen. Begleitet werden Güterströme innerhalb der Logistiksysteme in der Regel von entsprechenden Informationsflüssen (Pfohl 2018, S. 5).

Transport-, Umschlag- und Lagerprozesse in Logistiksystemen lassen sich mit Hilfe des Instrumentariums der **Graphentheorie** als Netzwerke visualisieren und untersuchen (Bretzke 2015, S. 102ff). Innerhalb dieses Netzwerks fließen Güter von **Versandknoten** zu **Empfangsknoten**, die verschiedenen Knoten werden durch **Kanten** miteinander verbunden. Während die Knoten zum Beispiel Logistikstandorte für Umschlag- und Lagerprozesse oder Industrie- bzw. Handelsstandorte als Quellen und Ziele darstellen können, repräsentieren die Kanten je nach Analysegegenstand entweder Fahrzeug- oder Güterflüsse, Anlagen der Verkehrsinfrastruktur wie Straßen oder Schienenwege, logische Beziehungen, Raumwiderstände oder hierarchische Ordnungselemente eines Unternehmens (Mattfeld und Vahrenkamp 2014, S. 5).

Während Umschlag- und Lagerprozesse in aller Regel sowohl in Unternehmen des produzierenden Gewerbes bzw. des Handels verrichtet werden müssen, hat sich aus dem Speditions- und Transportgewerbe in den letzten Jahrzehnten mit der **Logistikbranche** ein Wirtschaftszweig entwickelt, der mittlerweile in weit überwiegendem Maße die notwendigen Transportleistungen als spezialisierter Dienstleister im Auftrag von Handel und Industrie erbringt (Bretzke 2015, S. 357ff). Die Unternehmen dieses Wirtschaftszweigs werden synonym entweder als *Logistikdienstleister*, *Logistikdienstleistungsunternehmen* oder *Logistikunternehmen* bezeichnet (Hompel und Heidenblut 2011, S. 185; Pfohl 2018, S. 4; Gleißner und Möller 2009, S. 119). Die **Logistikdienstleistungsunternehmen** (im Folgenden: LDL) übernehmen als gewerbliche Anbieter in einem hochkompetitiven Wettbewerbsumfeld in zunehmendem Maße auch mit den logistischen Kernprozessen verbundene fertigungsnahe Dienstleistungen wie z.B. kundenbezogene Kommissionierung, Fertigung und Montage oder Fakturierung (Hompel und Heidenblut 2011, S. 185).<sup>8</sup>

---

<sup>8</sup> In der Praxis bzw. der Literatur zur Logistik gebräuchlicher ist die aus dem Englischen stammende Bezeichnung „Third Party Logistics“ oder kurz 3PL für diese Unternehmen (Hompel und Heidenblut 2011, S. 185). Aus ästhetischen Gründen wird im Folgenden jedoch das deutsche Akronym LDL verwendet.

Die Nachfrage nach Transport-, Lager- und Umschlagdienstleistungen ist ihrer Natur nach abgeleiteter Art (Sjöstedt 2000). Die **Transportnachfrage** entsteht aufgrund der wirtschaftlichen Austauschprozesse bzw. den **Wirtschaftsrelationen** auf den primären Gütermärkten, sie determiniert so gleichzeitig aber auch die durch Verkehrsplaner mess- und beobachtbare **Güterverkehrsnachfrage** als eine Kenngröße, die Verkehrssysteme aggregiert charakterisierbar macht. Diesen Zusammenhang verdeutlicht Abbildung 2-3 grafisch.

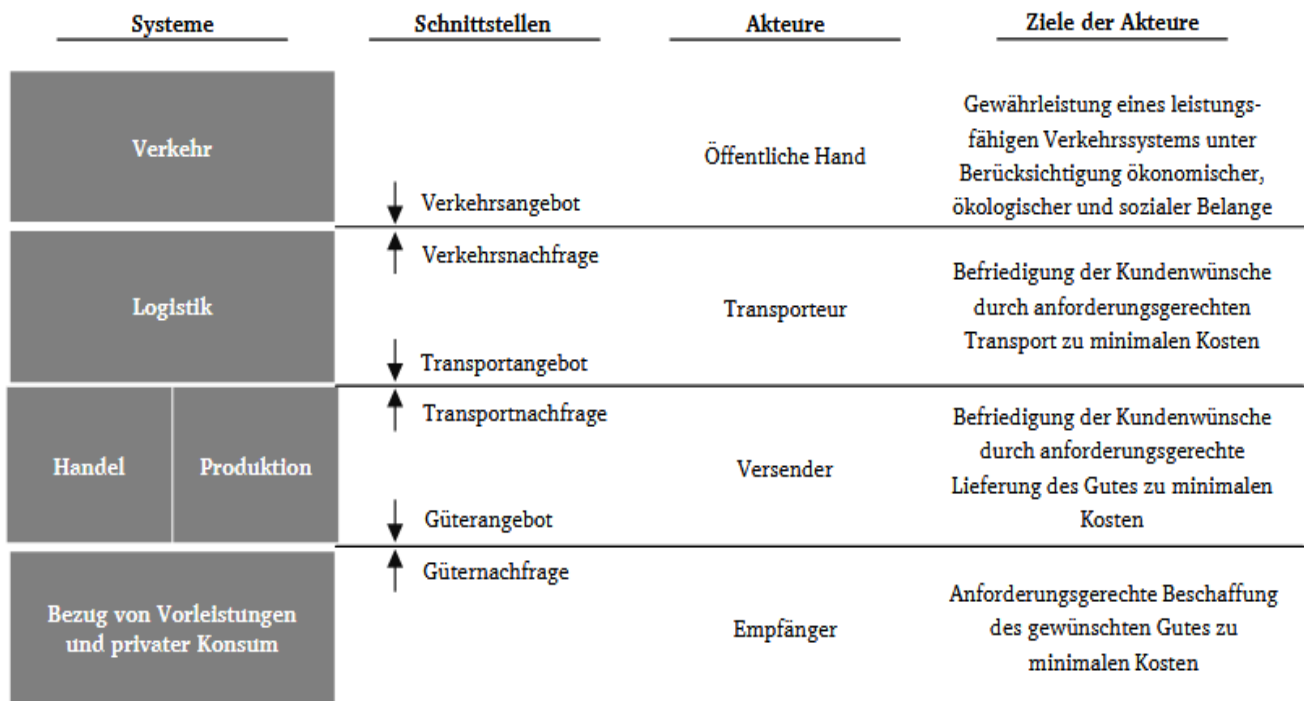


Abbildung 2-3: Zusammenhang zwischen Logistik- und Güterverkehrsnachfrage  
(Quelle: Rühl 2018, S. 5).

Dem räumlich differenzierten **Güterangebot** der produzierenden Unternehmen, des Handels, der privaten Konsumenten sowie weiterer Sektoren steht eine entsprechende, ebenfalls räumlich differenzierte **Güternachfrage** dieser Akteursgruppen gegenüber (Rühl 2018, S. 5). Durch ein räumliches und zeitliches Auseinanderfallen von Güterangebot und -nachfrage entsteht der Bedarf zur Ortsveränderung der gehandelten Güter. Werden diese Bedarfe auch realisiert, entsteht die Nachfrage nach Transport- bzw. Logistikdienstleistungen.

Der **Transportnachfrage** steht ein entsprechendes **Transportangebot** in Form des angebotenen Dienstleistungsspektrums der Logistikbranche gegenüber.<sup>9</sup> Im Wege einer Kunden-Lieferanten-Beziehung (i.d.R. durch einen Kontraktlogistik- oder Speditionsvertrag) werden die LDL beauftragt, ein Transportgut bzw. mehrere konsolidierte Transportgüter bei einem Versender abzuholen und diese bei einem Empfänger innerhalb eines festgelegten Zeitfensters anzuliefern (Mühlencoert 2012; Stölzle

<sup>9</sup> Wie bei jeder wirtschaftlichen Entscheidung zur Inanspruchnahme einer Dienstleistung oder der Beschaffung eines Gutes steht ein Entscheider vor der grundsätzlichen Frage, ob das Gut bzw. die Dienstleistung selbst erbracht bzw. hergestellt oder fremdbezogen werden soll. In Bezug auf die Transportnachfrage beantworten die Entscheider diese Frage weit überwiegend mit Fremdbezug der Leistungen (Kille et al. 2010).

2010, S. 22ff). Insbesondere bei kleinen Sendungsgrößen der Transportgüter entstehen dann zur Bündelung der Transportgüter verschiedener Kunden ein- oder mehrgliedrige Transportketten, die das Erbringen von Umschlagdienstleistungen bzw. kurzfristiger Lagerleistungen notwendig machen (Pfohl 2018, S. 6). Zur Durchführung der Transportdienstleistungen nehmen die LDL in aller Regel das durch die öffentliche Hand bereitgestellte **Verkehrsangebot** mit den ihnen zur Disposition stehenden Transportmitteln in Anspruch. Hierdurch werden Verkehrsbedarfe realisiert, es entsteht also die **Güterverkehrsnachfrage**.

### 2.1.3.2. Güterverkehr und Güterverkehrssysteme

Zur Abgrenzung verschiedener Verkehrszweige hat sich in der Verkehrsplanung eine Reihe von **Klassifikationen** mit entsprechenden Klassifikationsmerkmalen etabliert, wie in Abbildung 2-4 grafisch gezeigt. Ein häufig verwendetes Klassifikationsmerkmal ist der **Verkehrsanlass**: wird das Verkehrsangebot für „...Ortsveränderungen von Personen und/oder Gütern zu erwerbswirtschaftlichen, gemeinwirtschaftlichen oder dienstlichen Zwecken...“ in Anspruch genommen, wird dies mit **Wirtschaftsverkehr** bezeichnet (Wermuth und Wirth 2005, S. 296). Damit lässt sich der **Wirtschaftsverkehr** vom **Privatverkehr** abgrenzen, dessen Anlass in nichtdienstlichen bzw. privaten Aktivitäten begründet liegt

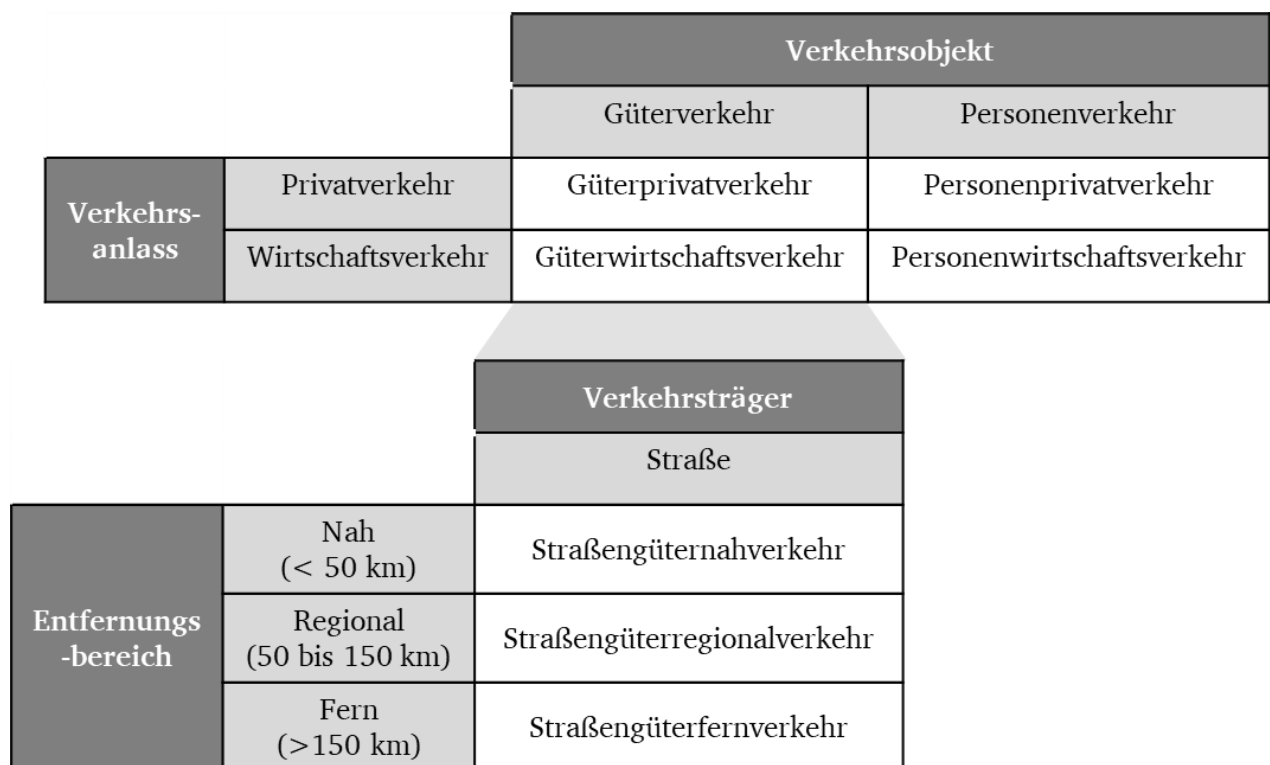


Abbildung 2-4: Güterverkehr als Teil des Wirtschaftsverkehr  
(Quelle: eigene Darstellung).

---

Je nach Untersuchungsgegenstand oder Analyseobjekt können verschiedene **Verkehrsobjekte** im Mittelpunkt des Interesses stehen. Hierbei wird in der Regel zwischen den Ortsveränderungen von Gütern oder den Ortsveränderungen von Personen unterschieden. **Güterwirtschaftsverkehr** bezeichnet dann in diesem Zusammenhang in Abgrenzung zum **Güterprivatverkehr** die Ortsveränderung von Gütern zu gewerblichen Zwecken (nach Wermuth und Wirth 2005, S. 296).<sup>10</sup> Nachfolgend wird synonym zu *Güterwirtschaftsverkehr*, also den Ortsveränderungen von Gütern zu Erwerbszwecken oder gemeinwirtschaftlichen Zwecken, die kürzere und gebräuchlichere Begriffsbezeichnung *Güterverkehr* verwendet (siehe auch die obere Tabelle in Abbildung 2-4).

Wenn neben dem Verkehrsobjekt und dem Verkehrsanlass als Klassifikationsmerkmale noch zusätzlich nach **Verkehrsträger** differenziert wird, kann mit Blick auf den Straßengüterverkehr nach verschiedenen Entfernungsbereichen unterschieden werden. Die statistische Klassifikation des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA) eignet sich hier besonders. Diese bezeichnet alle Ortsveränderungen unter 50 Kilometer Wegstrecke zwischen Quelle und Ziel als Straßengüternahverkehre während bei einer Distanz zwischen Quelle und Ziel zwischen 50 und maximal 150 Kilometern vom Straßengüterregionalverkehr gesprochen wird (Kraftfahrt-Bundesamt 2018 bzw. 2014). Schließlich zeichnet sich der Straßengüterfernverkehr durch eine Wegstrecke von mehr als 150 Kilometern aus.

Für diese Arbeit von besonderem Interesse ist der Straßengüterverkehr bzw. aus systemtheoretischer Sicht das **Straßengüterverkehrssystem**. Um Verkehrssysteme im Allgemeinen und das Straßengüterverkehrssystem im Besonderen analysieren und verstehen zu können, ist es notwendig, sie im Kontext des Aktivitätensystems ihrer Nutzer in einem bestimmten Gebiet zu sehen (Manheim 1976). Das Straßengüterverkehrssystem umfasst demnach die Gesamtheit aller Einrichtungen und Aktivitäten, die für Ortsveränderungen von Gütern über größere Entfernungen unter Nutzung des Verkehrsträgers Straße notwendig sind. Dies umfasst neben notwendigen Transportmitteln und den entstehenden Transportprozessen auch alle Quell- und Zielstandorte (z.B. Lager des Handels oder der Speditionslogistik) sowie die Aktivitäten innerhalb der Logistiksysteme der Logistikbranche.

Die **Güterverkehrsnachfrage** bildet das **Bindeglied** zwischen **Logistiksystemen** einerseits sowie den **Verkehrssystemen** andererseits: die Wirkungen des Verkehrs entstehen durch die Verkehrsmittelnutzung der Logistikdienstleister auf Verkehrswegen oder innerhalb von Verkehrsanlagen. Aus Sicht des Verkehrsplaners ist die **Summe der logistischen Entscheidungen** der Versender bzw. Empfänger auf der einen Seite sowie der Logistikdienstleister auf der anderen Seite im Ergebnis also als **Mengenphänomen** (Güterverkehrsnachfrage) messbar. Diese grundlegenden Zusammenhänge zwischen den privatwirtschaftlich organisierten Logistiksystemen und den öffentlichen Verkehrssystemen sind in Abbildung 2-5 noch einmal grafisch dargestellt. Dies bedeutet auch, dass sich die Güterverkehrsnachfrage wegen ihres derivativen Charakters sowie der komplex-adaptiven Eigenschaften nur indirekt beeinflussen lässt, so z.B. im Rahmen des sog. **Transportmanagements** als Weiterentwicklung des Mobilitätsmanagements für den Personenverkehr (Rühl 2018; Boltze 2013b; Boltze 2011).

---

<sup>10</sup> Der *Güterprivatverkehr* macht, gemessen an der gesamten Straßengüterverkehrsleistung, nur einen vernachlässigbar kleinen Anteil aus, sodass er hier keine Berücksichtigung findet.

---

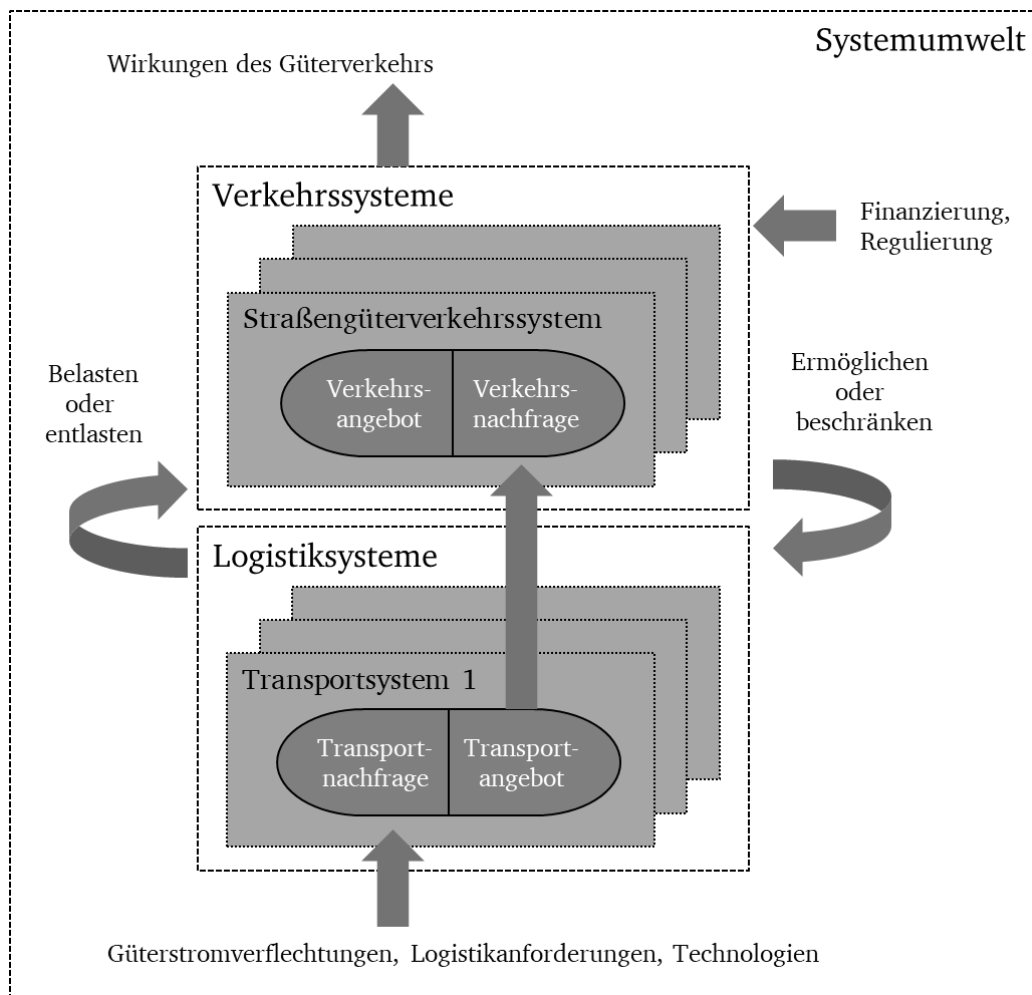


Abbildung 2-5: Zusammenhang von Logistik, Verkehr und Transport  
(Quelle: eigene Darstellung basierend auf Bretzke und Barkawi 2012, S. 166).

In diesem Zusammenhang **ermöglichen** auf der einen Seite die, durch die öffentliche Hand gebauten und betriebenen Verkehrssysteme bzw. das **Verkehrsangebot** grundsätzlich die Durchführung von Transporten unter Nutzung bestimmter, den Akteuren zur Verfügung stehender Technologien bzw. Transportmittel. Auf der anderen Seite **beschränkt** ein starkes **Auseinanderfallen** von **Verkehrsangebot** und **Verkehrsnachfrage** jedoch auch die **Transportdurchführung**, was wiederum **Rückkopplungen** und **Anpassungsreaktionen** innerhalb der Logistiksysteme zur Einhaltung der aus der Systemumwelt definierten Logistikanforderungen auslösen kann.

Umgekehrt **belasten** die **Logistiksysteme** unter Umständen die **Verkehrssysteme** und rufen so ggf. verkehrsplanerischen Handlungsbedarf im Rahmen des gebotenen Ausgleichs zwischen Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage hervor. Hierdurch kann ein **finanzieller Mehrbedarf** entstehen, der wiederum neben weiteren Akteuren auch von den Betreibern der Logistiksysteme zu tragen ist. Logistiksysteme können aber durch verschiedene Maßnahmen zur Entlastung der Verkehrssysteme beitragen. Insgesamt entstehen durch dieses Zusammenspiel letztlich **positive wie negative Wirkungen** des Güterverkehrs, die durch die Systemumwelt mehr oder weniger stark wahrgenommen werden, weswegen regulatorische Rahmenbedingungen gelockert oder verschärft werden können.



---

## 2.2. Analyse des deutschen Straßengüterverkehrssystems

Das Jahr 2014 war mit Blick auf den Güterverkehr bzw. die Logistikbranche für **Deutschland** ein Meilenstein: gemäß des Logistics Performance Index (LPI) der Weltbank wurde das Land zum ersten Mal zum **Logistik-Weltmeister** gekürt (Nicolai 2014). In den LPI gehen Bewertungskriterien wie die Einfachheit von Zollabfertigungsprozessen oder die Qualität der Verkehrsinfrastruktur ein, aber auch Kosten für Logistikdienstleistungen. Auch deren Verfügbarkeit und Qualität spielen eine Rolle bei der Bewertung. Zudem werden Zuverlässigkeit, Nachverfolgbarkeit und Pünktlichkeit der Transporte innerhalb des Güterverkehrssystems bewertet. Den Logistikweltmeister-Titel konnte Deutschland dann auch drei Jahre in Folge verteidigen. Neben den Organisationen, die in diesem Kontext hoheitliche Aufgaben wie Zollabfertigung und Infrastrukturbereitstellung wahrnehmen, haben zum Logistikweltmeister-Titel auch die Akteure der Logistikbranche einen großen Beitrag geleistet.

Die Akteure der Logistikbranche mit einem wirtschaftlichen Schwerpunkt im Straßenverkehr sind letztlich diejenigen, die von Systemen zur Energieversorgung von Lastkraftwagen während der Fahrt profitieren sollen bzw. diejenigen, die die planungsrelevante Verkehrsnachfrage erzeugen. Ein Verständnis der aktuellen **Situation auf dem deutschen Logistikmarkt** in Bezug auf diesen Marktbereich ist daher eine Voraussetzung für die Akzeptanz solcher Systeme (siehe auch Kühnel *et al.* 2018). Aus diesem Grund wird zunächst in diesem Abschnitt im Rahmen einer **makroskopischen Analyse** der deutsche Logistikmarkt für das Bezugsjahr 2015 beschrieben um eine konsistente Datengrundlage gewährleisten zu können. Anschließend wird auf die Logistikdienstleistungsbranche als Ganzes eingegangen wodurch ein Eindruck des Wettbewerbsumfelds der Branche vermittelt werden soll. Mittels einer mikroskopischen Analyse werden dann typische Geschäftsmodelle im Straßengüterverkehr im Zuge einer **Unternehmens-Typologie** vorgestellt sowie sich daraus ergebende **Netzwerk- und Transportmuster** beschrieben.

### 2.2.1. Makroskopische Analyse

#### 2.2.1.1. Logistikmarkt und Logistikbranche

Mit Einführung eines gemeinsamen europäischen Binnenmarktes im Jahr 1993 wurden für den Güterverkehr in Deutschland und den Staaten der Europäischen Union neue **Rahmen- und Wettbewerbsbedingungen** geschaffen (Aberle 2009, S. 99ff). Deutsche Transportunternehmer agierten bis dahin auf stark regulierten Verkehrsmärkten, die von Wettbewerbsbeschränkungen, der Vergabe von Konzessionen und einem Kabotageverbot gekennzeichnet waren. Daher waren sie auch weitgehend vor Konkurrenz aus dem Ausland geschützt. Nach einer Liberalisierung der Güterverkehrsmärkte führte der sich einstellende, stärkere Wettbewerbsdruck im Straßengüterverkehr zu **sinkenden Transportpreisen** und einem **intensiven Preiswettbewerb** (Deiters 2007).

Dennoch sind die Güterverkehrssysteme in Deutschland durch eine flächendeckend verfügbare Infrastruktur, daraus resultierende, (relativ) kurze Transportzeiten und häufig einer direkten Verbindung zwischen Quelle (Versender) und Senke (Empfänger) gekennzeichnet (Dabidian und Langkau 2013). Dies liegt einerseits daran, dass eine **große Nachfrage nach logistischen Dienstleistungen** seitens der exportorientierten Unternehmen aus Handel und Industrie besteht. Andererseits hat sich, bedingt durch den intensiven Wettbewerb seit der weitgehenden Deregulierung der Transportmärkte, eine im internationalen Vergleich leistungsfähige **Angebotsseite spezialisierter**

---

**Logistikunternehmen** mit breitem Angebotsspektrum logistischer Leistungen entwickelt (Gudehus 2012).

Im europäischen und im weltweiten Vergleich belegt der **deutsche Logistikmarkt** in Bezug auf seine Größe immer wieder **Spitzenplätze** (Kille *et al.* 2015). Im Jahr 2015 belief sich der Umsatz auf dem deutschen Logistikmarkt beispielsweise auf ca. 259 Mrd. Euro. Mit deutlichem Abstand folgen auf den weiteren Plätzen Großbritannien mit einem Marktvolumen von ca. 139 Mrd. EUR und Frankreich mit ca. 128 Mrd. EUR. Der deutsche Logistikmarkt konnte damit ca. 27% des gesamteuropäischen Logistik-Umsatzvolumens auf sich vereinigen.

### Gesamtumsatz in allen europäischen Ländern (2015):

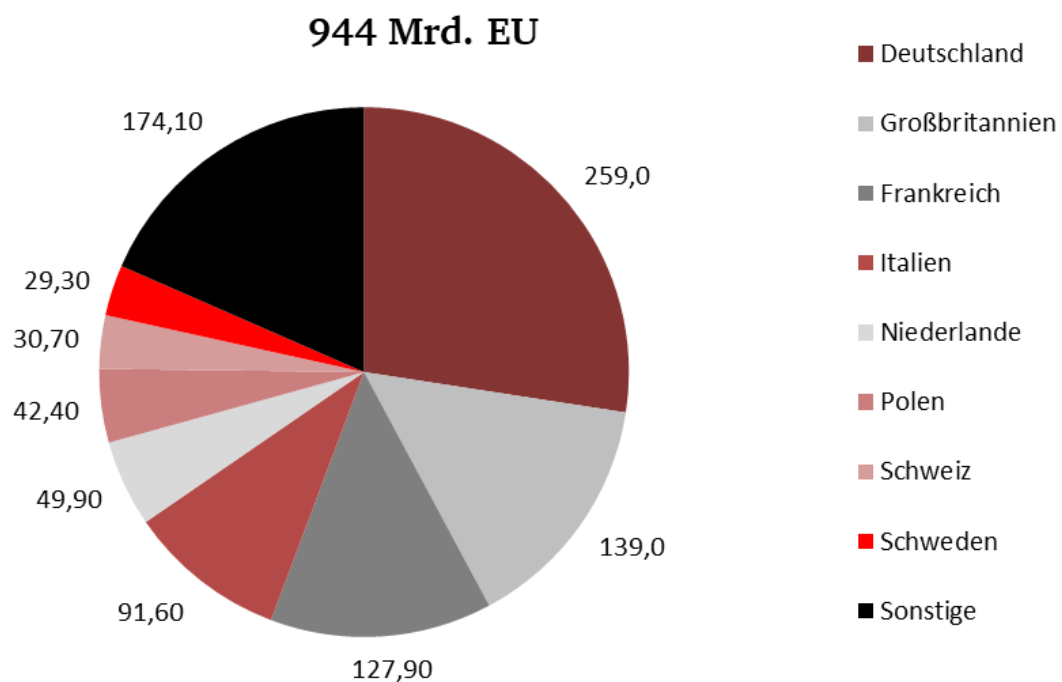


Abbildung 2-6: Größe der europäischen Logistikmärkte nach Umsatz in Mrd. EUR und Ländern in 2015  
(Quelle: Kille *et al.* 2015).

Der deutsche Logistikmarkt kann, je nach Untersuchungszweck, weiter differenziert werden, wozu sich eine Reihe von Differenzierungskriterien anbieten (Kille 2010; Kille *et al.* 2015). Wird beispielsweise auf die Art der in einem Marktsegment zu erbringenden Logistikdienstleistung abgestellt, zeigt sich, dass im Jahr 2016 etwa **45% des Logistikmarktvolumens auf Transportdienstleistungen** entfielen. Die Transportdienstleistungen, also die Bewegung von Gütern auf den Verkehrsanlagen, sind für die Verkehrsplanung als Verkehrsnachfrage messbar. **Weitere**, mit den Transporten **verbundene Leistungen** wie Logistikplanung, Bestandsführung und Bestandskosten sowie Umschlag- und Lagerdienstleistungen gemeinsam etwa **55% des gesamten Marktvolumens** auf sich vereinten, wie sich Abbildung 2-6 entnehmen lässt.



---

Hinsichtlich der Transportdienstleistungen ist eine interessante Entwicklung festzustellen: der **Werkverkehr**, also Transportleistungen, die Unternehmen im Selbsteintritt und nicht für Dritte erbringen, wies im Jahr 1998 noch einen Anteil von 31% an der gesamten Straßengüterverkehrsleistung deutscher Lastkraftfahrzeuge auf, bis zum Jahr 2016 sank dieser Anteil auf etwa 14,3% (Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung 2017).<sup>11</sup> Da gleichzeitig auch das Straßengüterverkehrsaufkommen bzw. die **Straßengüterverkehrsleistung** gestiegen sind, ist davon auszugehen, dass diese Transporte in weit überwiegender Zahl nun also von den **spezialisierten Logistikdienstleistungsunternehmen** durchgeführt werden.

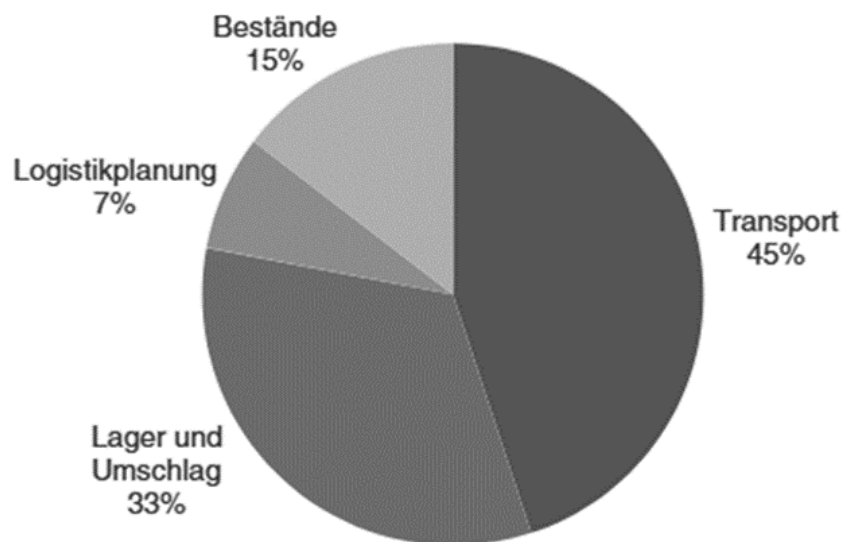


Abbildung 2-7: Anteilige Aufteilung des Logistikmarkt-Volumens auf logistische Leistungsbereiche, Jahr: 2016  
(Quelle: Schwemmer 2016).

Werden diese Marktbereiche weiter in einzelne **Marktsegmente** aufgegliedert, zeigt sich ein interessantes Bild in Bezug auf die Bedeutung der mit dem Straßengüterverkehr assoziierten Marktsegmente, wie sich aus Abbildung 2-7 entnehmen lässt (Schwemmer 2016). Während diejenigen Marktsegmente, die nicht oder nur in Teilen dem Straßengüterverkehr zuzurechnen sind, darunter standortbezogene Leistungen (z.B. Terminaldienste), Luft- und Seefracht oder Massengutlogistik (vorwiegend per Eisenbahn und Binnenschiff), nur etwa 22% des gesamten Branchenumsatzes auf sich vereinen, entfallen die übrigen **78% auf Marktsegmente**, die annähernd vollständig unter Nutzung des **Verkehrsträger Straße** arbeiten.

Im Straßengüterverkehr sind die **umsatzstärksten Segmente** die **Industrielle Kontraktlogistik**, die **Konsumgüterdistribution** bzw. **-kontraktlogistik** sowie die **allgemeinen Ladungsverkehre**. Gemeinsam vereinen diese drei Segmente mit etwa 51% etwas mehr als die  **Hälfte des gesamten Marktvolumens** auf sich. Mit Blick auf Transporte im Straßengüterverkehr sind in den beiden

---

<sup>11</sup> Da das Werkverkehrsaufkommen bzw. die Werkverkehrsleistung nur für deutsche Lastkraftfahrzeuge in öffentlichen Statistiken ausgewiesen werden, wurde hier auch nur dieses Verkehrsaufkommen bzw. diese Verkehrsleistung als Berechnungsgrundlage gewählt. Vermutlich weist der Werkverkehr aber einen weitaus geringeren Anteil bezogen auf das gesamte Verkehrsaufkommen europäischer und deutscher Lastkraftwagen bzw. die korrespondierende Verkehrsleistung auf, da ausländische Lastkraftwagen vermutlich überwiegend dem gewerblichen Verkehr zuzurechnen sind.

---

Kontraktlogistik neben den Transporten auch andere Logistikleistungen enthalten neben zweckgebundenen Transporten enthalten, während in den allgemeinen Ladungsverkehren auch straßengebundene Teilleistungen für intermodale Verkehre (z.B. zur Distribution von Seecontainern) enthalten sind.

In einigen **Logistikmarkt-Segmenten** wie z.B. im Segment der Kurier-, Express- und Paketdienstleistungen oder im Segment der expeditionellen Sammel- bzw. Stückgutleistungen werden die **nachgefragten Transporte nahezu vollständig durch Logistikdienstleistungsunternehmen erbracht** (Schwemmer 2016). Zwar weisen die beiden Segmente einen relativ geringen Anteil am gesamten Logistikmarkt-Volumen aus, sie sind aber geprägt durch eine **hohe Flächenabdeckung** mit Hilfe engmaschiger Transportnetzwerke, eine hohe Anzahl *ex ante* planbarer Linienverkehre und gleichzeitig einen hohen Kostendruck (Sebastian 2013; Bednarczyk 2012; Wieberneit 2008).

In diesem Wettbewerbsumfeld sind Betriebskostensparnisse, die sich aus einer Einführung von Systemen zur Energieversorgung während der Fahrt ergeben, hoch willkommen (Hacker *et al.* 2020). Daneben kann eine weitgehende Abdeckung dieser **Art von Transportnetzwerken** auch eine Abdeckung großer Teile der gesamten Güterverkehrsnachfrage bedeuten. Aus diesen Gründen kann ihnen bei der Einführung von Systemen zur Energieversorgung von Lastkraftwagen während der Fahrt eine **Schlüsselrolle** zukommen

### Verteilung des Logistikmarkt-Volumens auf Marktsegmente (Mrd. EUR, 2015)

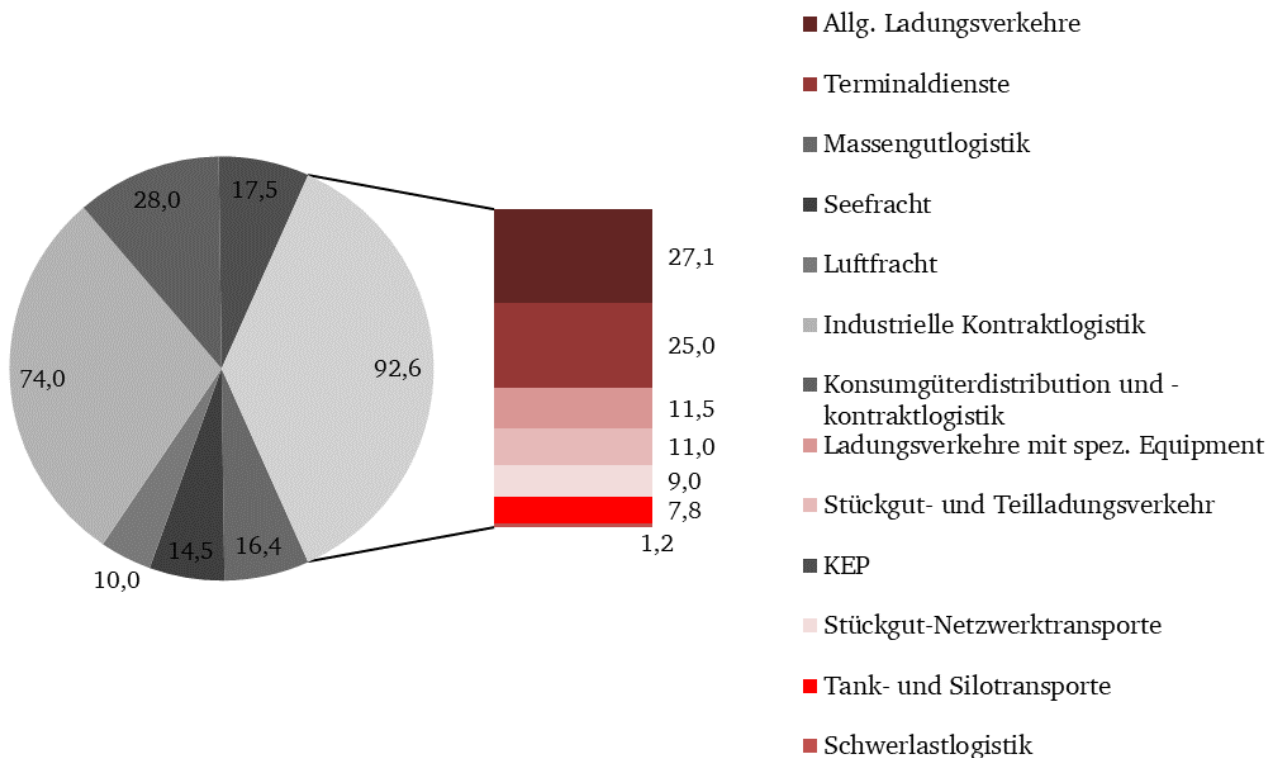


Abbildung 2-8: Umsatz nach Marktsegmenten, Deutschland, 2016  
(Quelle: Schwemmer, 2016).

---

Bezogen auf die **Anzahl der Beschäftigten** war die Logistikbranche mit ca. 3 Millionen Beschäftigten im Jahr 2016 der **drittgrößte Wirtschaftsbereich** nach der Automobilwirtschaft und dem Handel, womit sie sich noch vor der Elektronikbranche und dem Maschinenbau platziert (Schwemmer 2016). Die Beschäftigten der Logistikbranche arbeiten zu einem weit überwiegenden Teil **in kleinen und kleinsten Unternehmen**, d.h. in Unternehmen mit maximal 50 Beschäftigten. Ein Großteil dieser Beschäftigten sind selbstständige Fuhrunternehmer, die häufig als Subunternehmer im Auftrag der Logistik- und Handelsunternehmen vor allem Transportdienstleistungen im Straßengüterverkehr erbringen. Zudem existieren neben einer **mittelständischen Basis auch einige größere Unternehmen** bzw. Konzerne, die auch im Bundesgebiet sowie grenzüberschreitend Systemverkehre sowie intermodale Leistungen anbieten. Die Verteilung der Unternehmen in Größenklassen ist in Abbildung 2-9 dargestellt. (Statistisches Bundesamt 2018). Bei einer Analyse der Zeitreihe ist auffällig, dass vor allem im Bereich der Kleinstunternehmen unter 5 Mitarbeitern seit 2014 eine große Anzahl an **Unternehmens-Neugründungen** stattgefunden haben muss, während die Anzahl der anderen Unternehmens-Größenklassen in etwa konstant geblieben ist. Gleichzeitig ist dadurch auch die Zahl der Beschäftigten im Wirtschaftsbereich *Verkehr und Lagerei* überdurchschnittlich angestiegen.

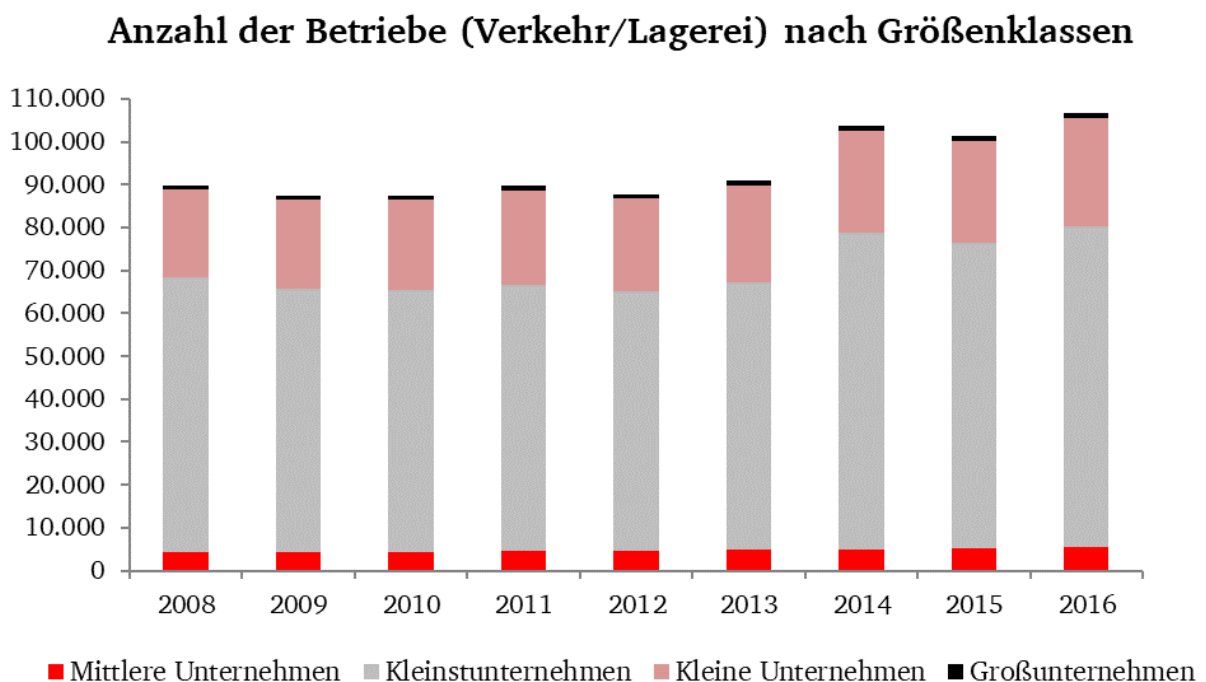


Abbildung 2-9: Verteilung der Betriebe im Wirtschaftszweig Verkehr und Lagerei auf Größenklassen, 2008 bis 2016  
(Quelle: Statistisches Bundesamt 2018).

Das **Verhältnis** der **Unternehmen** der Logistikbranche zu den Akteuren der **öffentlichen Hand** auf allen politischen Ebenen ist geprägt von dem Wunsch, adäquate wirtschaftliche und soziale **Rahmenbedingungen** zur Erbringung ihrer logistischen Dienstleistungen am jeweiligen Niederlassungs-Standort vorzufinden, wie auch aus Abbildung 2-10 ersichtlich wird (SCI Verkehr 2018). Dies umfasst einerseits die sog. **weichen Standortfaktoren** wie Schulen und Bildungseinrichtungen vor Ort oder die Verfügbarkeit von qualifizierten Arbeitskräften zu einem angemessenen Lohnniveau. Andererseits umfassen diese Rahmenbedingungen eher **harte Standortfaktoren** wie das Vorliegen eines

---

Autobahnanschlusses in der Nähe, Lage und Größe des Grundstückes bzw. dessen Kauf- bzw. Mietpreis, die Ausstattung einer Miet-Immobilie sowie die Nähe zu Kunden oder Kooperationspartnern sowie Zugang zu den Anlagen der Güterverkehrssysteme wie intermodalen Umschlagzentren oder See- bzw. Binnenhäfen.

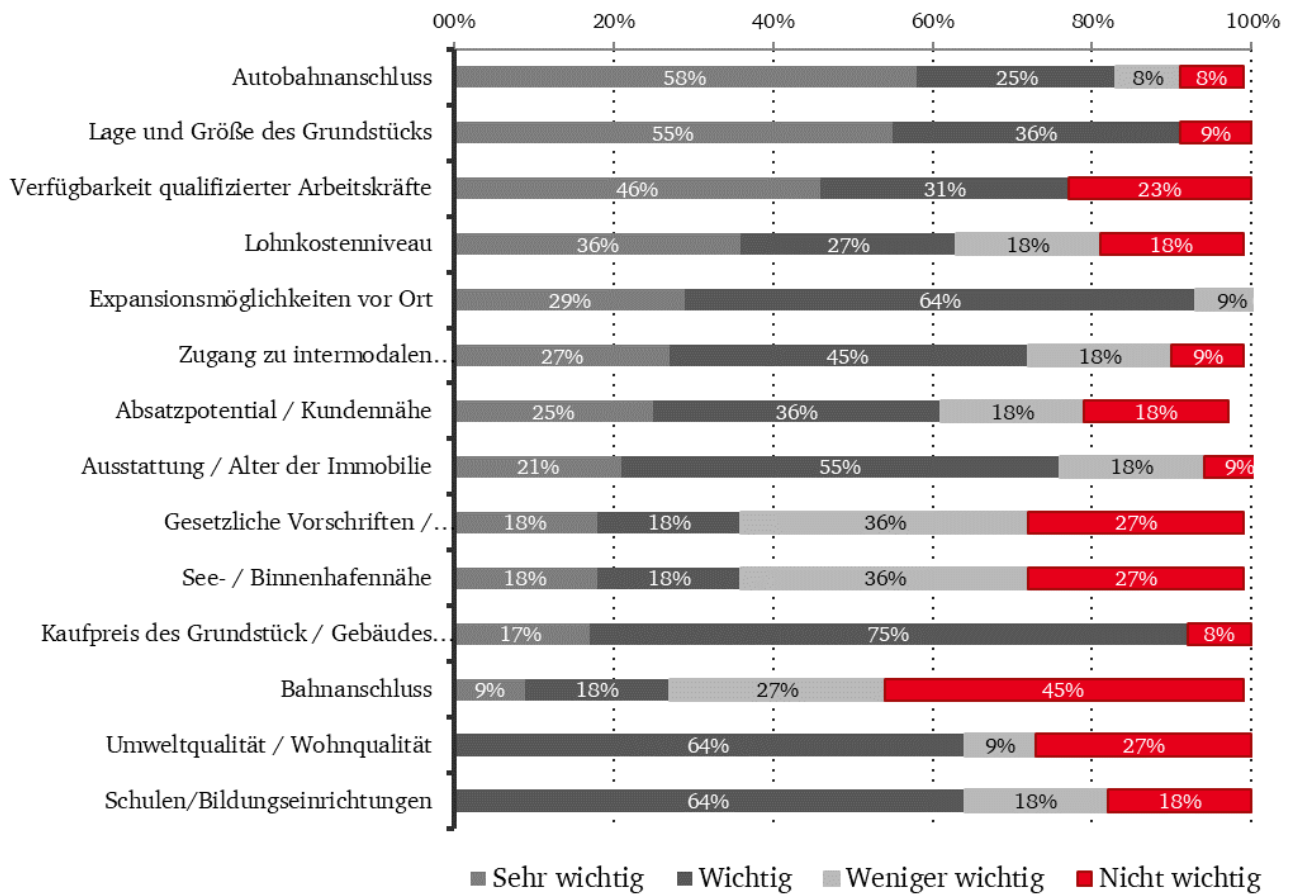


Abbildung 2-10: Bewertung von Standortfaktoren aus Sicht von Logistikunternehmen  
(Quelle: SCI Verkehr 2018).

### 2.2.1.2. Räumliche Niederlassungsmuster der Logistikbranche

Die im Rahmen der vorgestellten Umfrage hypothetisch formulierten Ansprüche an Logistik-Standorte zeigen sich in Teilen auch in den tatsächlichen **räumlichen Niederlassungsmustern** der Logistikbranche, die sich aus der Analyse einer Logistikstandort-Datenbank ergeben haben (Rolko und Friedrich 2017). Diese **Logistikstandort-Datenbank** wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes zu Beginn des Jahres 2014 am Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik der Technischen Universität Darmstadt unter Mitwirkung des Autors angelegt und wird seitdem laufend erweitert bzw. aktualisiert. Sie enthält (Stand März 2020) insgesamt etwa 4.000 Standorte von 1.200 Logistikdienstleistungsunternehmen in Deutschland. Außerdem sind bereits ca. 350 Standorte von Lagern des Lebensmitteleinzelhandels enthalten.

Die bisher in die Datenbank aufgenommenen Standorte stellen eine **Zufallsstichprobe** aus einer Grundgesamtheit unbekannten Umfangs dar. Dies liegt daran, dass die genaue Anzahl aller logistikbezogenen Standorte in Deutschland nicht aus öffentlich zugänglichen Datenquellen gewonnen werden kann und demzufolge geschätzt werden muss (Nehm 2014). Die hierfür zuverlässigste Quelle stellt eine Studie des Fraunhofer Instituts dar, gemessen an der dort veröffentlichten Anzahl aller Standorte der Logistikdienstleistungsunternehmen in Deutschland enthält die Logistikstandort-Datenbank bisher etwa 72% dieser geschätzten Gesamtanzahl (Veres-Homm *et al.* 2015). Die Verteilung der erfassten Standorte auf die 402 deutschen Kreise und kreisfreie Städte sowie die Nähe zum Autobahn-Netz sind in Abbildung 2-11 auf der folgenden Seite dargestellt.

Die Standorte wurden im Wege einer **Sekundärdatenerhebung** in die Datenbank aufgenommen. Hierfür wurden wissenschaftliche Quellen, Internetseiten, Pressemitteilungen oder Fachmagazine bzw. -zeitschriften genutzt. Je Standort wurden verfügbare **Strukturmerkmale** wie Grundstücksfläche, Logistikfläche, Anzahl der verfügbaren Paletten-Stellplätze, Anzahl gewerblicher und kaufmännischer Mitarbeiter oder Anzahl der Tore bzw. Rampen erhoben. Außerdem wurden dessen Einbindung in logistische Netzwerke (z.B. in Stückgutkooperationen) sowie die bedienten Marktsegmente (z.B. Kontraktlogistik oder Stückgut) festgehalten. Zudem wurde die Postanschrift des Standortes aufgenommen, wodurch eine exakte räumliche Verortung möglich wird. Wichtige Kenngrößen der Stichprobe sind in Tabelle 2-1 festgehalten.

Tabelle 2-1: Übersicht wichtiger Kenngrößen der erfassten Standort-Stichprobe  
(Quelle: eigene Erhebung).

Merkmale	Stich-probe	Summe	Minimum	Maximum	Median	Arith. Mittel	Standard-abweichung
Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	297	22.905.163	2.000	3.370.000	36.000	77.122	216.946
Logistikfläche [m <sup>2</sup> ]	876	13.101.130	125	260.000	8.000	14.956	21.684
Paletten-Stellplätze [-]	277	4.677.515	15	126.000	10.000	16.886	19.524
Rampen [-]	223	8.908	1	239	27	40	37
Mitarbeiter [-]	500	51.588	10	1.000	60	103	130
Fahrzeuge [-]	263	14.670	5	500	40	56	59



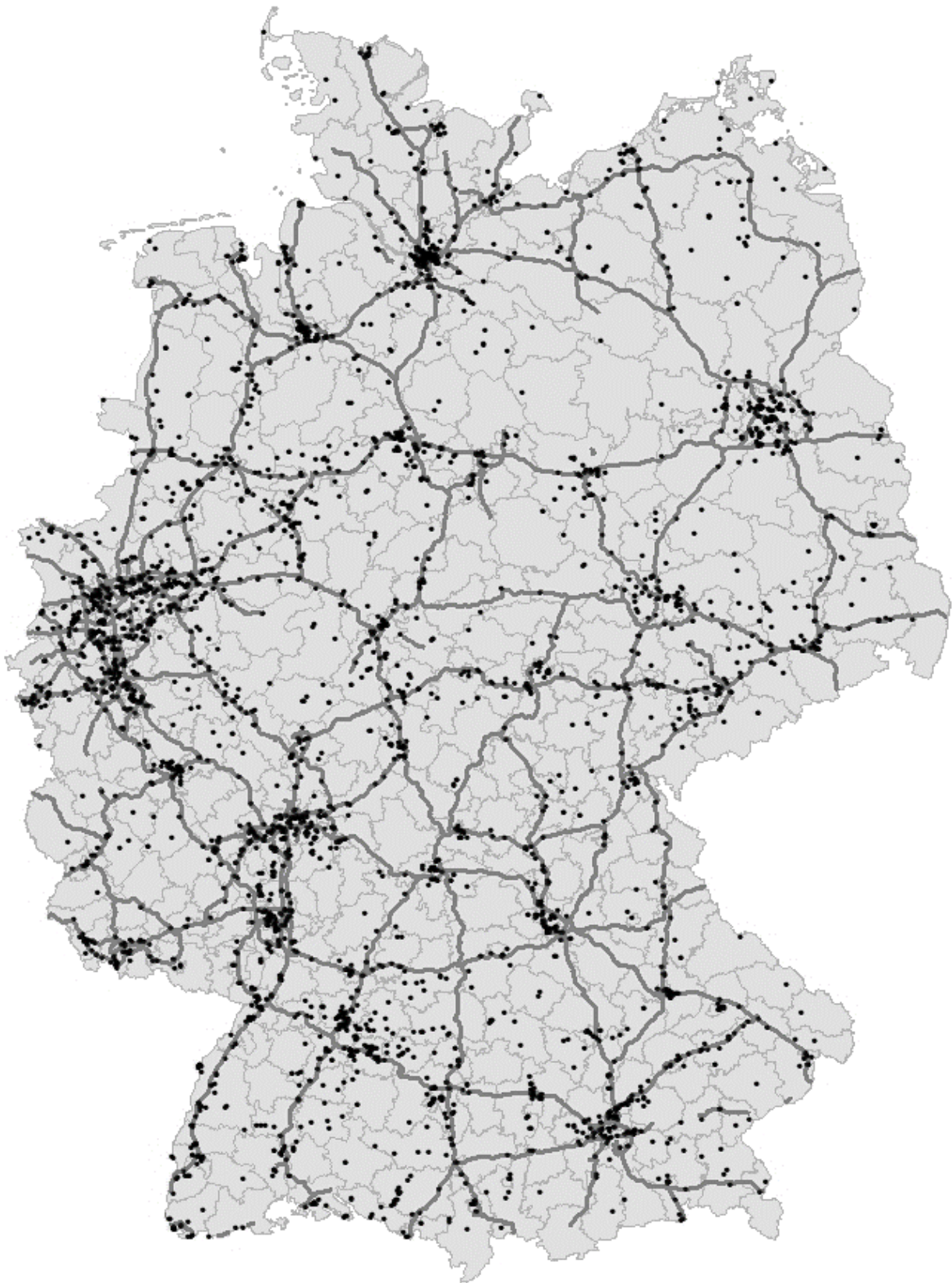


Abbildung 2-11: Verteilung der Standorte von Logistikdienstleistern auf Kreise und kreisfreie Städte, Jahr: 2019  
(Quelle: eigene Erhebung/Darstellung).

Werden die Standorte gemäß ihrer **Logistikfläche** in verschiedene **Größenklassen** eingruppiert, ergibt sich die in Tabelle 2-2 dargestellte Verteilung. Die Standorte verteilen sich relativ homogen auf die einzelnen Größenklassen, die zu Vergleichszwecken aus (Veres-Homm *et al.* 2015) übernommen worden sind. Lediglich die Klassen der sehr großen Logistikstandorte ab 50.000 qm Logistikfläche sowie die mittlere Größenklasse von 5001 bis 10.000 qm sind über- bzw. Unterrepräsentiert. 62% der Standorte sind kleiner als 10.000 qm da Logistikdienstleister typischerweise keine großen Lagerflächen benötigen, sondern lediglich im Wege des *Cross-Docking* Flächen zum Umschlag benötigen (Koether 2012).

Die vergleichsweise hohe absolute Häufigkeit hinsichtlich der mittleren Größenklasse zwischen 5.001 und 10.000 qm lässt sich damit erklären, dass dies die typische Größe eines Standorts im Segment des landgebundenen Straßengüterverkehrs (Ganzladungen, Teilladungen, Stückgut) ist. Insgesamt entspricht die hier beobachtete Größenverteilung derjenigen Größenverteilung, die auch bei (Veres-Homm *et al.* 2015) vorzufinden ist.

Tabelle 2-2: Verteilung der Standorte auf einzelne Größenklassen  
(Quelle: eigene Erhebung).

Größenklassen [m <sup>2</sup> ]	Absolute Häufigkeit	Relative Häufigkeit	Summen- häufigkeit
< 3.000	161	18,4%	161
3.001 - 5.000	138	15,8%	299
5.001 - 10.000	244	27,9%	543
10.001 - 20.000	159	18,2%	702
20.001 - 50.000	130	14,8%	832
50.001 - 100.000	34	3,9%	866
> 100.000	9	1,0%	875

Neben den flächenbezogenen Kenngrößen sind **Erreichbarkeitsanalysen** insbesondere aus verkehrs- bzw. Raumplanerischer Sicht von besonderem Interesse (Rodrigue *et al.* 2017). Der Begriff der Erreichbarkeit ist „... eine Beschreibung von Potentialen zu räumlichen Interaktionen...“ (Hesse *et al.* 2012; Thomas *et al.* 2003). Bezogen auf die Nähe zum Netz der Bundesautobahnen hat eine solche Erreichbarkeitsuntersuchung auf Grundlage der vorgestellten Standortdaten unter Nutzung eines entsprechenden Verkehrsnetzmodells ergeben, dass etwa **75% aller erfassten Logistikstandorte weniger als fünf Kilometer** entfernt zur nächstgelegenen **Autobahnanschlussstelle** angesiedelt sind. 90% aller Standorte liegen weniger als 10 Kilometer entfernt zur nächsten Autobahnanschlussstelle. Die verbleibenden 10% der Logistikstandorte sind in ländlichen Räumen angesiedelt oder dienen der Versorgung der Nord- und Ostseeinseln.

---

Die Verteilung der Standorte auf Entfernungsklassen ist in Abbildung 2 12 dargestellt. Ein möglichst **guter Zugang zum Netz** der übergeordneten Straßen scheint also ein **entscheidender Faktor** für die Wahl eines Niederlassungs-Standorts zu sein während gleichzeitig davon ausgegangen werden kann, dass die „letzte Meile“ für Fahrten, deren Ziel ein Logistikstandort ist, in etwa zwischen fünf und zehn Kilometern lang ist.

**Straßen-Entfernung der Logistikstandorte zur nächsten Autobahn-Anschlussstelle (in km)**

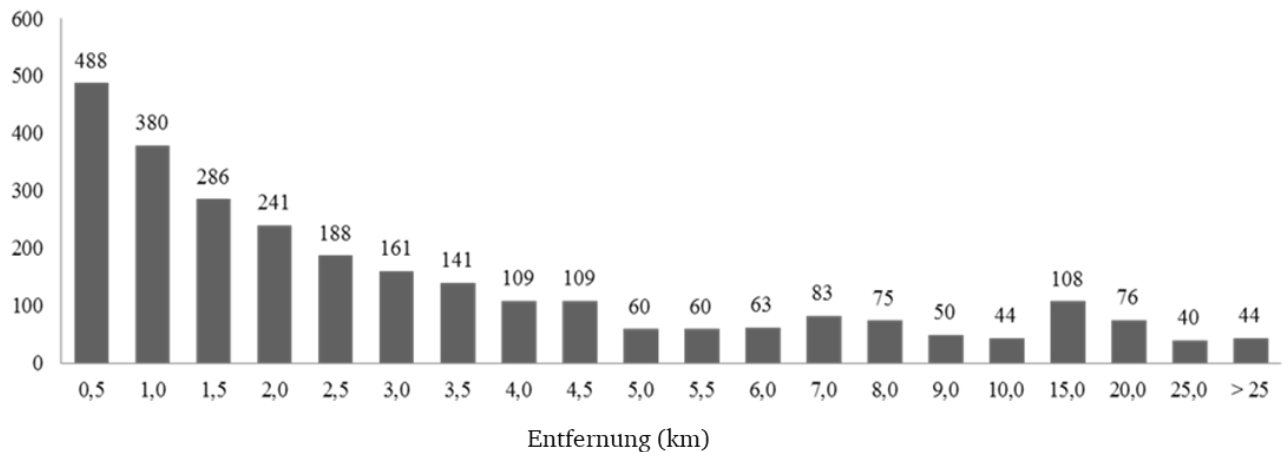


Abbildung 2-12: Verteilung der Standorte auf Entfernungsklassen (in km)  
(Quelle: eigene Darstellung/Erhebung).

Hieraus wird noch einmal ersichtlich, dass bei entsprechender Dimensionierung der Energiespeicher auch bei Verlassen des übergeordneten Straßennetzes bzw. im Zulauf auf dieses ein **hoher Anteil** der **Fahrleistung** im Vor- oder Nachlauf im **elektrischen Betriebsmodus** und somit besonders schonend für Mensch und Umwelt abgewickelt werden könnte. Lediglich für innerstädtische Verteilertouren oder Fahrten, die nicht direkt zwischen Logistikstandorten stattfinden, müssten entsprechende Lösungen gefunden werden.



## 2.2.2. Mikroskopische Analyse

### 2.2.2.1. Transportketten im Straßengüterverkehr

Im Güterverkehr umfasst eine **Transportkette** eine aufgabenspezifische Abfolge verschiedener Transport-, Lagerungs- bzw. Umschlagsprozesse zur Beförderung von Gütern zwischen zwei Orten (Dabidian und Langkau 2013). Ziele bei der Gestaltung von Transportketten sind die Beförderung der Güter „...in möglichst kurzer Zeit, mit möglichst geringen Kosten und unter höchstmöglicher Schonung der Objekte“ (Brauer 1991, S. 22). Prinzipiell mögliche **Konfigurationen von Transportketten** im Straßengüterverkehr sind in schematisch Abbildung 2-13 dargestellt.

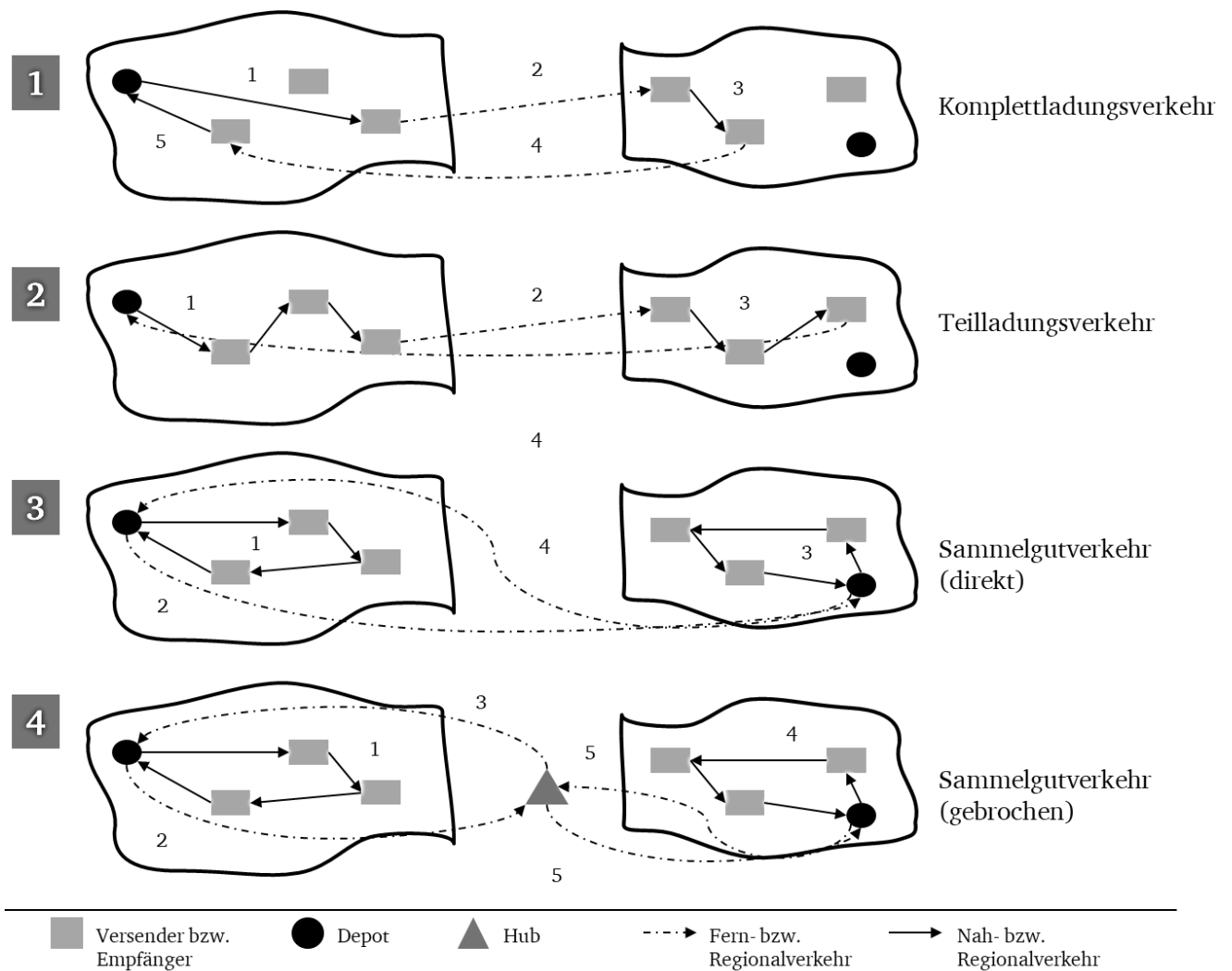


Abbildung 2-13: Prinzipielle Typen von Transportketten im Straßengüterverkehr  
(Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Bretzke 2015, S. 198).

---

Transportketten können aufgrund der Umschlagshäufigkeit in zwei Grundtypen eingeteilt werden: eingliedrige und mehrgliedrige Transportketten. **Eingliedrige Transportketten** liegen dann vor, wenn keine weiteren Umschlagvorgänge außer dem ersten Beladen und dem letzten Entladen erforderlich sind. Dies geht häufig mit einer zu befördernden Menge an Transportobjekten einher, die das meist relativ große Transportmittel (z.B. eine Zugmaschine mit Sattelaufleger) nahezu vollständig gewichts- oder volumenbezogen auslastet (Deymann 2011). Transporte dieser Art werden als Komplett- oder Ganzladungsverkehre (bzw. *engl. Full Truckload, FTL*) bezeichnet (Bretzke 2015, S. 196). Bei Komplettladungsverkehren kann noch zwischen regelmäßig wiederkehrenden Linien- und *ad hoc* durchzuführenden Gelegenheitsverkehren (sog. Trampfahrten) unterschieden werden.

**Mehrgliedrige Transportketten**, wie in Abbildung 2-13 unter 2 bis 4 dargestellt, sind durch weitere Be- und Entladevorgänge neben dem ersten Beladen bzw. dem letzten Entladen gekennzeichnet, es sind ggf. auch Umschlagsvorgänge und Lagerungsvorgänge erforderlich. Bei mehrgliedrigen Transportketten können auch verschiedenartige Transportmittel für die einzelnen Transportvorgänge zum Einsatz kommen. Die Beförderung der Güter in einer mehrgliedrigen Transportkette vollzieht sich prinzipiell in drei Phasen (Bretzke 2015).

In der ersten Phase, die auch als **Vorlauf** bezeichnet wird, werden einzelne, einen Lastkraftwagen nicht vollständig volumen- oder gewichtsbezogen auslastende Transportobjekte an ihren Abgangsorten eingesammelt und ggf. zu einem Depot in unmittelbarer Nähe zur Quellregion gebracht. Dort werden die im Vorlauf aufgenommenen Transportobjekte nach Zielregion sortiert und zur Auslastung eines Transportmittels ggf. mit weiteren Transportobjekten zusammengefasst. Die sich anschließende Phase des **Hauptlaufs** verbindet das Quell-Depot mit einem Depot in unmittelbarer Nähe zur Zielregion der Transportobjekte. Alternativ können die für den Hauptlauf verbundenen Transportobjekte in einem zwischengeschalteten, zentralen Depot (sog. *Hub*) erneut gebrochen werden und dann von dort aus zum Zieldepot transportiert werden. Die Transportobjekte werden bei Ankunft am Ziel-Depot bzw. in der Zielregion im Rahmen des **Nachlaufs** zu den Empfängern der Transportobjekte gebracht.

Eine Variante der mehrgliedrigen, ungebrochenen Transportkette ist der **Teilladungsverkehr** (*engl. part load* oder kurz *PTL*). Im Teilladungsverkehr werden mittels eines großen Transportmittels (z.B. einer Zugmaschine mit Sattelaufleger) innerhalb eines Quellgebiets Sendungen aufgenommen, die gemeinsam für eine gewichts- bzw. volumenbezogene Auslastung des Fahrzeuges sorgen, einzeln jedoch nicht (Bretzke 2015, S. 196). Eine Einzelsendung im Teilladungsverkehr wiegt typischerweise zwischen 1,2 und 1,5 Tonnen (Dabidian und Langkau 2013, S. 146). Im Zielgebiet, das im Hauptlauf direkt angefahren wird, müssen daher auch mehrere Sendungen zugestellt werden. Wie bei Komplettladungen muss das Transportmittel aus dem Zielgebiet heraus mit einer bzw. mehreren Rückladungen versorgt werden (Bretzke 2010, S. 177).

Um auch kleinere Sendungsgrößen als Teilladungen wirtschaftlich organisieren zu können, transportieren Stückgut- oder KEP-Unternehmen diese Sendungen in **Sammelgutverkehren**, die auch als *less-than truckload* oder LTL-Verkehre bezeichnet werden (Dabidian und Langkau 2013, S. 147). Dabei handelt es sich typischerweise um „... *Stückgut, Pakete, Fässer, Langgut und nicht palettierte Ware mit einem Einzelgewicht zwischen 30 kg und 2,5 Tonnen* ...“ (ebenda, S. 147).<sup>12</sup> Die Logistikdienstleister verwenden im Vor- und Nachlauf des Sammelgutverkehrs meist kleinere Lastkraftwagen mit einem zul.

---

<sup>12</sup> Als Stückgut wird eine Güterart bezeichnet, „...die aus sich heraus, verpackt oder mit einer Ladeeinheit verbunden (meist Paletten) so formbeständig ist, dass sie bei Transport-, Lagerungs- und Umschlagsvorgängen als einzelne Beförderungseinheit zu behandeln ist.“ (Krieger 2018).

---

Gesamtgewicht zwischen 3,5 und 7,5 Tonnen, um die Güter zu bzw. von den Logistikstandorten bzw. Depots zu transportieren.

Im Sammelgutverkehr werden einzelnen Sendungen, zumeist nicht zielgebietsorientiert, im Rahmen des Vorlaufs bei den Versendern in einem Quellgebiet eingesammelt und in einem Depot zu einer Sammelladung für ein Depot in unmittelbarer Nähe zum Zielgebiet (ungebrochener bzw. direkter Sammelgutverkehr) oder für ein bestimmtes Hub (gebrochener Sammelgutverkehr) konsolidiert.

Bei den **ungebrochenen Sammelgutverkehren** wird die Sammelladung vom Quelldepot dann mit größeren Transportmitteln direkt zu einem Zieldepot gebracht und die eingehende Sammelladung erneut gebrochen. Im Rahmen des Nachlaufs, wieder mit kleineren Transportmitteln, werden die Sendungen dann mittels einer sog. Verteiltour dem jeweiligen Empfänger zugestellt (Ohr 2008, S. 5).

Bei den **gebrochenen Sammelgutverkehren** wird die, im Quelldepot eingehende Sammelladung mit weiteren eingehenden Sendungen konsolidiert und dann mittels eines großen Transportmittels zu einem Hub transportiert. Dort werden alle eingehenden Sammelladungen aus den verschiedenen Gebieten erneut gebrochen, zielgebietsorientiert zu einer neuen Sammelladung für ein bestimmtes Zieldepot zusammengefasst und mittels eines großen Transportmittels dorthin abtransportiert. Dort angekommen, erfolgt die Verteilung der Sendungen im Wege einer Verteiltour im Nachlauf.

---

### 2.2.2.2. Typologie von Straßengüterverkehrsunternehmen

Die Angebotsseite der logistischen Märkte wird, wie oben bereits ausgeführt, durch die LDL gebildet. Eine **Differenzierung** der LDL nach dem Umfang ihres Angebotes logistischer Leistungen ist im Hinblick auf das Ziel dieser Arbeit notwendig, da Kenntnisse über die Leistungserstellungs-Muster dieser Unternehmen mit Blick auf die zu entwickelnde Methode notwendig sind. In der Literatur existieren vielfältige Abgrenzungen und Charakterisierungen logistischer Unternehmen, die jeweils auf unterschiedliche Merkmale der Unternehmen abstellen (z.B. Kummer *et al.* 2011, S. 298-314; Scholz-Reiter *et al.* 2008; Gleißner und Femerling 2016, S. 40-86; Gudehus 2012, S. 1041-1061). Es bietet sich für diese Arbeit eine Differenzierung auf Grund der **Spezialisierung bzw. des Geschäftsmodells** der Unternehmen im Hinblick auf die skizzierten logistischen Prozess- bzw. Leistungsarten an. Die verschiedenen Typen von Logistikdienstleistungsunternehmen sind in Tabelle 2-3 überblicksartig charakterisiert worden.

Tabelle 2-3: Eigenschaften und Merkmale der LDL-Typen  
(Quelle: in Anlehnung an Gudehus 2012, S. 1041-1061).

Merkmale	Einzeldienstleister	Verbunddienstleister	Systemdienstleister
Leistungsumfang	Einzelleistungen (TUL-, Spezialleistungen)	Verbundleistungen (Speditions-, Frachtketten)	Systemleistungen (Betrieb von Bereitstellungs- bzw. Distributionssystemen)
Ressourcen	Transportmittel, Logistikbetriebe	Transportnetzwerke, Umschlagsterminals	Logistiknetzwerke, Logistikzentren
Know-how	Technisches Spezialwissen	Technik, EDV, IKT, Organisation	Logistik, IKT, Planung, Projektmanagement
Ausrichtung	Fachspezifisch (Güter, Relationen)	Leistungsspezifisch (Frachtarten, Netzwerke)	Kundenspezifisch (Branchen, Kunden)
Gebiet	Regional und national	National und global	Lokal, national, global
Kundenkreis	Klein, temporär (wechselnd)	Groß, anonym (veränderlich)	Wenige Großkunden (gleichbleibend)
Ausschreibung, Vertrag	Anfrage Auftrag Bestätigung	Anfrage/Ausschreibung Auftrag Rahmenvereinbarung	Ausschreibung Absichtserklärung Dienstleistungsvertrag
Bindung an Auftraggeber	Kurz (unterschiedlich)	Mittel (bis 1 Jahr)	Lang (3 bis 10 Jahre)

---

## Einzeldienstleister

Die erste Gruppe der Logistikunternehmen bilden die **Einzeldienstleister**, die sich durch ihre Spezialisierung auf die ausschließliche Erbringung logistischer Einzelleistungen charakterisieren (Scholz-Reiter *et al.* 2008, S. 584-585). Die größte und bedeutendste Leistungsgruppe innerhalb der Einzeldienstleister machen die Transportdienstleistungen aus, die im Jahre 2015 etwa 45% des Gesamtvolumens im Logistikmarkt bildeten, wie an anderer Stelle bereits ausgeführt. Transport-**Einzeldienstleister spezialisieren** sich häufig auf bestimmte **Güterarten, Ladeeinheiten oder Branchen** und agieren räumlich im Regional- bzw. Nahverkehr oder im nationalen Fernverkehr. Transport-Einzeldienstleister werden auch als Transporteure oder Carrier bezeichnet und treten oft **Subkontraktoren** größerer logistischer Unternehmen auf oder beteiligen sich an unternehmensübergreifenden Kooperationen, vor allem im Marktsegment des Stückguts (Schwemmer *et al.* 2015; Gleißner und Femerling 2016, S. 79-80). Daneben existieren Einzeldienstleister, die **Umschlag- und Lagerleistungen sowie Spezialleistungen** anbieten. Im Bereich des Lagerns existieren bspw. Lagerhausgesellschaften, Tank- und Silobetreiber oder Deponien. Umschlagsdienstleister sind z.B. Hafenbetriebe, Terminalbetreiber im kombinierten Verkehr oder Bodenverkehrsdienste in der Luftfracht.

Einzeldienstleister greifen bei der Leistungserstellung häufig auf im **Eigenbesitz befindliche Betriebsmittel** (Transportmittel, Logistikeinrichtungen) zurück. Einige Einzeldienstleister verfügen daneben über tiefgehendes **Spezialwissen** oder spezielle Betriebsmittel (z.B. Tank- und Silofahrzeuge, Schwerlastfahrzeuge) ihres jeweiligen Gebietes, weswegen in diesem Zusammenhang auch von Spezialdienstleistern gesprochen wird (Gudehus 2012, S. 1042-1044).

Die Einzeldienstleister können überwiegend der Gruppe der kleinsten und kleinen Unternehmen zugeordnet werden, was an den etwa 30.000 gemeldeten Unternehmen im gewerblichen Güterverkehr festmachen lässt, die ausschließlich als selbstfahrende Transporteure tätig sind (Wieland 2010, S. 49). Diese Unternehmen werden als **reine Frachtführer** bezeichnet und bieten aus Sicht der Kunden eine standardisierte Leistung an, weswegen sie nahezu ausschließlich über den Marktpreis, d.h. die Frachtraten, konkurrieren und als Preisnehmer auftreten. In der gemeinsamen Betrachtung des Kundenkreises von Einzeldienstleistern mit den entsprechenden Vertragslaufzeiten je Kunde, ist innerhalb dieser Kategorie eine hohe Variation festzustellen. Hoch spezialisierte Dienstleister können wenige Kunden mit sehr langen Vertragslaufzeiten besitzen, während die reinen Frachtführer in der Regel viele wechselnde Kunden mit kurzen Vertragslaufzeiten aufweisen (Gudehus 2012, S. 1042-1044).

## Verbunddienstleister

Die zweite Gruppe von Unternehmen, die **Verbunddienstleister**, verknüpfen mehrere Einzelleistungen zu höherwertigen Verbundleistungen oder erbringen daneben Einzelleistungen. Dazu bedienen sie sich einerseits der Ressourcen von Einzeldienstleistern, indem sie deren Leistungen einkaufen oder andererseits ihrer eigenen Betriebsmittel (Scholz-Reiter *et al.* 2008, S. 585-586). Sie sind dadurch in der Lage, auf (eigene oder virtuelle) **hochgradig standardisierte Transportnetzwerke** zurückzugreifen um ihrem meist anonymen Kundenkreis umfassende Leistungsangebote zu unterbreiten, die neben der reinen Transportleistung z.B. auch Verzollung und die elektronische Erstellung und den Versand eines Avis umfassen. Das primäre Ziel der Verbunddienstleister ist es, ihr **Transportaufkommen zu bündeln und dadurch ihre Transportnetzwerke bestmöglich auszulasten**, da mit Verbunddienstleistungen relative geringe Margen erzielt werden können (Zadek 2004, S. 22). Verbunddienstleister sind mit ihren

---

---

Umschlags- und Lagereinrichtungen stark in der Fläche vertreten, wodurch eine hohe Abdeckung potentieller Kundenkreise erreicht werden kann.

Zusätzlich zum jeweiligen Spezialwissen über den Einkauf bzw. die Verknüpfung von Einzelleistungen benötigen die Verbunddienstleister besondere Fähigkeiten im Bereich der Prozessorganisation ihrer Netzwerke, der prozessbegleitenden Datenverarbeitung und –weitergabe sowie im Betrieb und Aufbau der entsprechend notwendigen IKT-Systeme. Verbunddienstleister operieren national bzw. global und bedienen sich oft nur einem Verkehrsträger, auch wenn einige Verbunddienstleister intermodale Transportketten anbieten (Zadek 2004, S. 22). Aus Kundensicht ist eine **Verbundleistung** eine **standardisierte Leistung** weswegen der Kundenkreis der Verbunddienstleister auch relativ groß und die Vertragslaufzeiten kurz sind und in der Regel ein Jahr nicht überschreiten. Verbunddienstleister agieren vermehrt in der Konkurrenz um sog. Transportmengen-Tender (Mühlencoert 2012). Diese Tender definieren über einen Zeitraum mehrerer Monate eine feste Anzahl an Transporten auf festgelegten Relationen. In einem Ausschreibungsprozess wählt das ausschreibende verladende Unternehmen in der Regel den Anbieter aus, der die Ausschreibungskriterien am besten erfüllt. Häufig ist bei vorab definierten Qualitätsniveaus der Leistungserbringung dann der Angebotspreis ausschlaggebend. Verbunddienstleister streben daher häufig nach Betriebskostensparnissen, zum Beispiel durch die Anschaffung verbrauchsarmer Fahrzeuge und dadurch resultierende, niedrigere Fahrzeugbetriebskosten.

Die Gruppe der **Verbunddienstleister** ist in der Praxis sehr **heterogen**. Ein prominentes Beispiel eines Verbunddienstleisters kann im klassischen Spediteur gemäß §453 HGB gesehen werden. Im HGB wird der Spediteur dadurch charakterisiert, dass er Güterversendungen im Auftrag eines sog. Verladers zu organisieren hat. Diese Güterversendung kann einerseits im sog. Selbsteintritt des Spediteurs erfolgen, er erbringt die gesamte Versendung selbst, d.h. er bewerkstelligt dann Umschlags-, Lager-, Transport- und Sonderleistungen in Eigenerstellung (Kummer *et al.* 2011, S. 310). Vom Spediteur zu unterscheiden ist nach §407 Abs. 1 HGB der sog. Frachtführer, der lediglich dazu verpflichtet ist, die entsprechende Sendung gemäß Frachtführervertrag am Bestimmungsort dem Empfänger zu übergeben. Darüber hinaus kann sich der Spediteur andererseits Leistungsangeboten von Einzeldienstleistern bedienen um auf diese Weise z.B. ein nationales Stückgutnetzwerk zu betreiben (Zadek 2004, S. 22). Alternativ kann er auch lediglich die Rolle eines Architekten einzelner Transportketten einnehmen, ohne eigene Ressourcen zu besitzen, wie dies im Luftfracht-Segment häufig der Fall ist. Weitere Beispiele für Verbunddienstleister sind Express- und Paketdienste, Entsorgungsunternehmen oder Airlines bzw. Reedereien, wenn sie Tür-zur-Tür-Transporte anbieten.

### Systemdienstleister

**Systemdienstleister**, die dritte Gruppe von Unternehmen, verfügen (wie Verbunddienstleister) über Zugriff auf Transportnetzwerke und logistische Einrichtungen, sie unterscheiden sich aber von den Verbunddienstleistern in dem sie ihre Angebote nicht für einen großen, anonymen Kreis von Kunden erstellen sondern ihre Leistungsangebote an einigen wenigen Großkunden ausrichten (Scholz-Reiter *et al.* 2008, S. 586-587). Damit sind sie in der Lage, den vergleichsweise größten Leistungsumfang zu bieten. Systemdienstleister entwickeln, realisieren und betreiben also **kundenindividuelle Logistiksysteme** entweder im Selbsteintritt oder über die Steuerung und Verpflichtung von Subkontraktoren. Dies müssen sie besser bzw. günstiger können als ihr jeweiliger Kunde, der sonst keinen Anreiz zum Auslagern eines Teils seiner Logistikprozesse hätte.

---

Daher benötigt ein Systemdienstleister die Kompetenz, **Einzelleistungen kundenbedarfsgerecht zusammenzufügen** und sich an die jeweilige IKT-Umgebung seines Kunden anzupassen um diesen umfassend zu informieren. Darüber hinaus muss der Systemdienstleister über detaillierte Kenntnisse der jeweiligen Kundenmärkte sowie der Segmente des Logistikmarktes verfügen. Auch eine gewisse Größe, verbunden mit entsprechender Marktmacht zur Durchsetzung von niedrigeren Preisen beim Zukauf von Einzelleistungen, wird vorausgesetzt.

Da die zur kundenindividuellen Leistungserstellung eingesetzten **Betriebsmittel** unter Umständen **speziell beschafft** werden müssen, wird auch von kundenspezifischer Widmung der Ressourcen gesprochen. Daher sind zur Absicherung solcher Investitionen längere Vertragslaufzeiten vorgesehen, die zwischen drei und zehn Jahren liegen können, weswegen auch vom Segment der Kontraktlogistik gesprochen wird (Borchert und Heuwing-Eckerland 2011, S. 5-7). Den **System- bzw. Kontraktlogistikdienstleistern** liegt im Idealfall eine detaillierte **Leistungsbeschreibung** des Kunden vor, die der Systemdienstleister in **voller Qualitäts- und Kostenverantwortung** zu erbringen hat (Mühlencoert 2012, S. 58-60). Das gesamte Umsatzvolumen solcher Kontrakte wird mindestens auf eine Million Euro pro Jahr beziffert. Die Kontrakte werden zumeist international ausgeschrieben, weswegen der internationale Wettbewerb für Kontraktlogistiker der entscheidende Schauplatz ist (Borchert und Heuwing-Eckerland 2011).

Im Rahmen der Vertragslaufzeit wird ein Systemdienstleister möglicherweise zu vorher vereinbarten, festen Leistungspreisen entlohnt. Hier besteht also aus Sicht des Systemdienstleisters ein Anreiz, durch die Hebung von Produktivitätspotentialen einen höheren Deckungsbeitrag aus dem Kontrakt zu erzielen (Mühlencoert 2012, S. 65-71). Systemdienstleister versuchen daher, trotz des **kundenindividuellen Zuschnitts** ihrer Leistungen, **Synergien** zu erzeugen, indem Kontraktlogistikleistungen zusätzlich mit einem **regulären Netzwerkgeschäft** angeboten werden (Zadek 2004, S. 22). Dies führt in Konsequenz dazu, dass einerseits die Transportnetze besser ausgelastet sind und andererseits bei der Ausschreibung der Systemleistung günstigere Preise angeboten werden können. Dieses praktisch durchaus folgerichtige Vorgehen hat aber theoretisch zur Folge, dass eine Einordnung in eine der Kategorien, besonders von großen Unternehmen, immer schwerer fällt. Dies liegt daran, dass deren Produktangebote häufig Leistungen aller drei Kategorien enthalten (Scholz-Reiter *et al.* 2008, S. 584).

Kontraktlogistiker unterliegen nach Beendigung des Leistungsvertrages dem **Risiko**, dass sie ihre **dedizierten Anlagen** nicht weiter nutzen können und versuchen daher z.B. Lagerhäuser für mehrere Kunden zusammen zu nutzen, wenn die Leistungsbeschreibung dies nicht unterbinden sollte (Borchert und Heuwing-Eckerland 2011, S. 12). Weitere Beispiele für Systemleistungen sind die Bestandsführungs- und Versorgungskonzepte seitens des Logistikunternehmens in der Automobilindustrie oder das Betreiben von Distributionssystemen im Kundenauftrag, wie dies im Einzelhandel üblich ist.

---



---

### 2.2.2.3. Netzwerkstrukturen des Straßengüterverkehrs

**Netzwerke** haben aufgrund ihrer **subadditiven Kostenstruktur** eine große Bedeutung für die Logistik bzw. den Güterverkehr. Ein Knoten, der neu an ein Netzwerk bestehend aus einer Anzahl von  $n$  Knoten angeschlossen wird, hat bereits eine **Verknüpfung** - direkt oder über Umwege - zu allen anderen Knoten und muss diese nicht erst einzeln neu aufbauen. Somit entstehen einmalige **Anschlusskosten** an das Netzwerk, die weitaus geringer sind als die Summe der Einzelkosten für die direkte Erschließung jedes einzelnen weiteren Knotens. Hinzu kommt, dass ein Netzwerk mit jedem zusätzlichen Knoten dichter wird und somit die **Anschlusskosten** für weitere Anbindungen aufgrund der größeren **Flächendeckung** sinken (Mattfeld und Vahrenkamp 2014, S. 10ff). Zusätzlich können aufgrund von positiven **Netzwerk-Externalitäten** mit jedem weiteren Knoten eines Netzwerkes überproportional hohe **Nutzenzuwächse** realisiert werden (Mattfeld und Vahrenkamp 2014, S. 11).<sup>13</sup> Diese Zusammenhänge sind in der Netzwerkökonomik auch als Metcalfesches Gesetz bekannt (Hofmann 2001).

#### Transportnetzwerke

Ein **Transportnetzwerk** „...ist ein geordnetes Durchflusssystem, das aus hierarchisch und geografisch angeordneten, im Hinblick auf ein Leistungsziel komplementären Ressourcenknoten und diese Knoten verbindenden Verkehrs- und Informationswegen („Kanten“) besteht und dem dauerhaft die Aufgabe zufällt, in einem Leistungsverbund Quellen (...) bedarfsgerecht und wirtschaftlich mit Senken (...) zu verbinden“ (Bretzke 2015, S. 102). Transportnetzwerke lassen sich mit dem Instrumentarium der **Graphentheorie** beschreiben bzw. modellieren (Mattfeld und Vahrenkamp 2014; Grünert und Irnich 2005b). Die Quellen und Senken in einem offenen Transportnetzwerk stellen in Form von **Knoten** daher z.B. Standorte des Handels und der Industrie dar, die Ressourcenknoten sind Lager- und Umschlagstandorte des Netzbetreibers. Die **Kanten** stellen logische, gerichtete oder ungerichtete Verbindungen der Knoten dar und werden z.B. mit Straßen- oder Luftlinienentfernungen, Zeitverbräuchen, Lieferfrequenzen oder Kosten, gewichtet.

Verbund- und Systemdienstleister wie z.B. Sammel- bzw. Stückgutspediteure und KEP-Dienstleister erbringen ihre Logistikdienstleistungen mittels **offener Transportnetzwerke**.<sup>14</sup> Charakteristisch für ein offenes Transportnetzwerk ist, dass der **Betreiber** des Netzwerks **nicht Eigentümer** der beförderten Güter ist. Der Kundenkreis erstreckt sich von Unternehmen aus Industrie und Handel über Privatkunden bis hin zu gemeinnützigen Organisation und der öffentlichen Hand, es liegt **also keine Spezialisierung** auf eine bestimmte Branche oder eine Zielgruppe vor.<sup>15</sup> Das typische **Sendungsgewicht** in Transportnetzwerken liegt bei KEP-Dienstleistern in der Regel unter 31,5 kg (Kille 2018, S. 67). Bei Stückgut rangieren die Sendungsgewichte zwischen 31,5 kg und unter 2,5 Tonnen, meist sind die Güter palettiert (Schwemmer *et al.* 2015). Die angestrebte, durchschnittliche **Sendungslaufzeit** in diesen

---

<sup>13</sup> Wird der Nutzen für jeden Netzknoten als proportional zur Anzahl der erreichbaren übrigen Knoten angesehen, steigt der Nutzen linear mit der Netzwerkgröße. Gilt dies für alle Teilnehmer, so verhält sich der Gesamtnutzen im Netzwerk als quadratische Funktion  $n^2 \cdot n$  bei einem Zuwachs von  $2n$  Knoten. Dieser Zuwachs wird als **Netzwerkexternalität** bezeichnet, da der Nutzenzuwachs nicht durch einen Austauschprozess auf einem Markt hervorgerufen worden ist.

<sup>14</sup> Geschlossene Transportnetzwerke zeichnen sich dadurch aus, dass die Güter, die innerhalb des Netzwerks transportiert werden, dem betreibenden Unternehmen gehören bzw. für dieses bestimmt sind (Bretzke 2015, S. 197). Daher sind geschlossene Transportnetzwerke häufig in Industrie und Handel zu finden.

<sup>15</sup> Eine Ausnahme bilden hier Transportnetzwerke für spezielle Güter wie z.B. kühl- bzw. tiefkühlbedürftige Ware, Möbel- und Umzugsdienstleistungen oder Gefahrgüter, für die in der Regel dedizierte Netzwerkstrukturen aufgebaut werden (Koether 2012).



---

Netzwerken beträgt national bis zu zwei Tage und international etwa eine Woche, wobei die konkreten Zustellzeiten in der Regel nicht fest vorab vereinbart werden (Dabidian und Langkau 2013, S. 150).

Um in dieser Weise Logistikdienstleistungen anbieten zu können, muss bezogen auf die Flächendeckung, ein dichtes Netz von Standorten vorgehalten werden, das mit regelmäßig verkehrenden Linienverkehren verbunden wird (Wieberneit 2008; Bednarczyk 2012). Nur so kann die flächendeckende Verteilung der Sendungen unter standardisierten Transportmerkmalen und –preisen gewährleistet werden. Daher konkurrieren die verschiedenen Anbieter vor allem über den Preis und sind besonders an Kostenersparnissen hinsichtlich der infrastrukturellen sowie der Flotten-Betriebskosten interessiert.

### Netzwerkkonfigurationen

Transportnetzwerke können nach **zwei grundsätzlichen** Mustern oder **Planungsparadigmen** gestaltet werden, die gleichsam als Extrema eines Spektrums gesehen werden können. Eine kombiniert-hybride Netzwerkconfiguration ist in der Praxis daher häufig anzutreffen (Bretzke 2015, S. 369-384; Dabidian und Langkau 2013, S. 150-151). Die beiden Grundkonfigurationen sind in Abbildung 2-14 illustrativ-schematisch dargestellt worden.

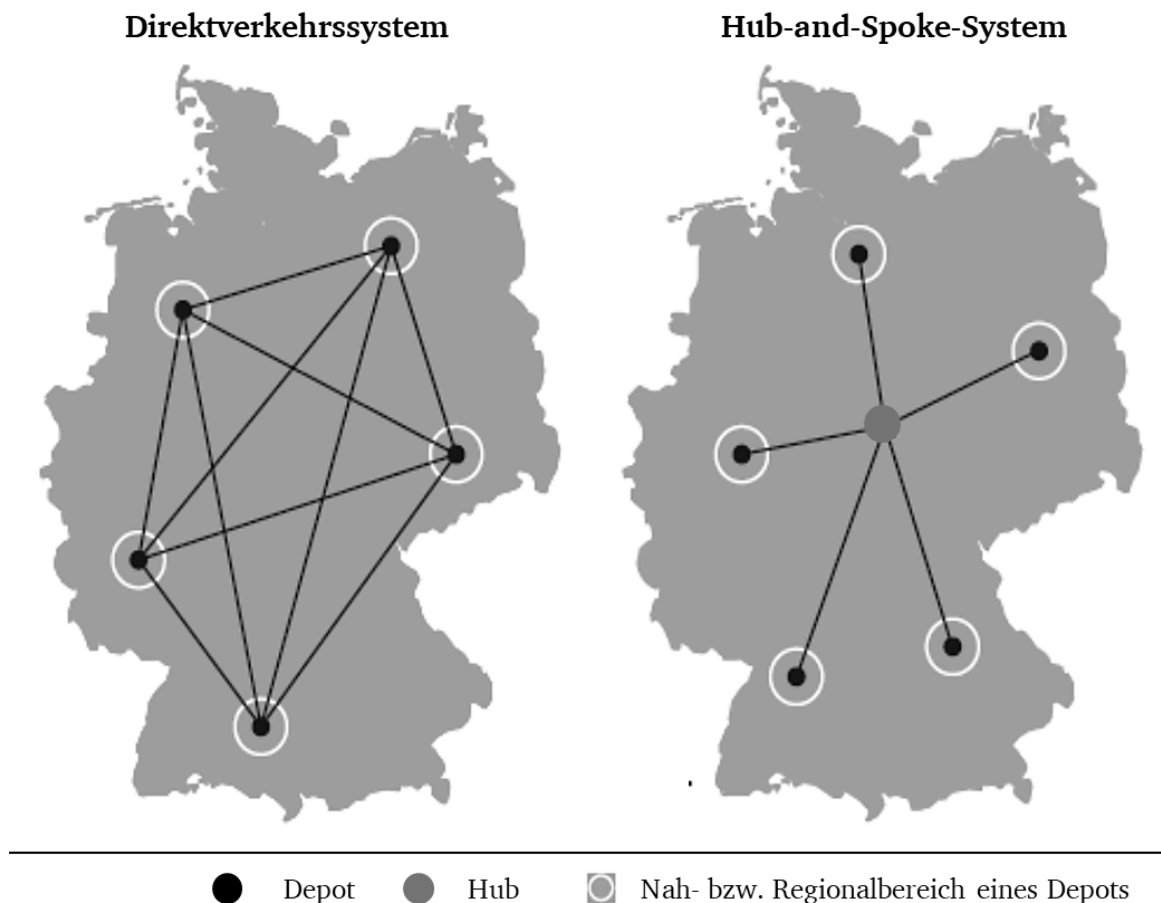


Abbildung 2-14: Grundkonfigurationen von Transportnetzwerken  
(Quelle: in Anlehnung an Dabidian und Langkau 2013, S. 151).

---

---

Das **Direktverkehrs- oder Rastersystem**, in Abbildung 2-14 links dargestellt, bildet den intuitiven Urzustand einer jeden Netzwerkkonfiguration dar: jeder Knoten ist mit jedem anderen Knoten über eine Kante (in diesem Kontext auch als *Relation* bezeichnet) direkt verbunden. Während vor und Nachlauf nach dem oben beschriebenen Muster erfolgen, findet in einem Rasternetz kein weiterer Umschlag während des Hauptlaufs statt. Bei  $n$  Knoten sind demnach  $(n(n-1))$  Relationen notwendig, um alle Sendungen im Direktverkehr zwischen den Depots zu verteilen (Cardeneo 2008a, S. 783). Die Vorteile eines Direktverkehrsnetzes liegen in den kurzen Laufzeiten sowie den kurzen zurückzulegenden Distanzen. Um ein reines Direktverkehrsnetz jedoch wirtschaftlich betreiben zu können, sind hohe Transportvolumina auf den einzelnen Relationen notwendig um durch die Mengenbündelung die Transportkosten im Hauptlauf für eine einzelne Sendung relativ gering halten zu können (Dabidian und Langkau 2013, S. 152). Daneben muss für jede Relation im Extremfall mindestens ein eigenes Fahrzeug vorgehalten werden, was sich negativ auf die Betriebskosten des Netzwerks auswirken kann.

Netzstrukturen mit einem oder mehreren Hauptumschlagsknoten werden als **Hub-and-Spoke-Systeme** bezeichnet (Dabidian und Langkau 2013, S. 152). Abgeleitet von der Gestaltung eines Rades mit **Nabe** (engl. *hub*) und **Speichen** (engl. *spokes*) wurde dieses System Ende der 1970er Jahre in der Praxis zuerst von großen amerikanischen Luftverkehrsunternehmen genutzt, um das Angebot an Zielflughäfen für die Kunden zu steigern und gleichzeitig die Flugfrequenz ausweiten zu können (Cardeneo 2008b). Von der Anwendung im Luftverkehr fand das System schließlich seinen Weg in die Logistikbranche. In dieser Netzwerkkonfiguration finden **keine Direktverkehre** mehr zwischen den **einzelnen Knoten** statt, sie werden **ausschließlich über einen zentralen Knoten** miteinander verbunden.

Das Prinzip eines Hub-and-Spoke-Systems im Straßengüterverkehr beruht darauf, dass zunächst in allen Quellgebieten der **Depots Sendungen eingesammelt** werden um dann konsolidiert zum **Hauptumschlagsknoten** transportiert zu werden. Dort werden alle eingehenden Sendungen zu **zielgebietsreinen Sammelladungen** konsolidiert und auf die angekommenen Fahrzeuge verteilt. Das von einem bestimmten Depot kommende Fahrzeug nimmt daher als **Rückladung** alle Sendungen mit, die Ziele im durch das Depot abgedeckten Gebiet haben, wo die eingehenden Sendungen dann verteilt werden. Da die Güter in einem Hub-and-Spoke-System von  $n$  Depots zu einem Hub und wieder zu  $n$  Depots befördert werden, sind  $2n$  Relationen notwendig, um ein solches Netzwerk betreiben zu können (Dabidian und Langkau 2013, S. 152).

Daher liegen die **Vorteile** dieses Systems gegenüber dem Direktverkehrssystem in der geringeren Anzahl von Kanten, die benötigt werden, um die gleiche Anzahl von Knoten zu verbinden sowie der bündelungsbedingten, höheren Auslastung der Fahrzeuge. **Nachteilig** sind jedoch die Gefahr einer Überlastung des Hauptumschlagsknotens und das höhere Risiko einer umschlagsbedingten Falschverladung. Zudem erhöhen sich in der Regel im Vergleich zum Direktverkehrsnetz die Sendungslaufzeiten bedingt durch den zusätzlichen Umschlag.

Die Wahl zwischen einer der beiden Netzwerkkonfigurationen „...wird durch das Netzaufkommen, dem zur Verfügung stehenden Zeitfenster und den Kosten für den Betrieb des Netzwerkes bestimmt“ (Dabidian und Langkau 2013, S. 152). Die häufig in der Praxis anzutreffenden **Mischformen** umfassen daher neben zusätzlichen **Regionalhubs**, in denen intra-regionale Verkehre konsolidiert und zwischen Regionen verteilt werden, können auch **zusätzliche Hauptumschlagsknoten** eingeführt werden. Daneben werden besonders **aufkommensstarke Relationen** mittels **Direktverkehren** bedient.

---

Ein grundlegendes Unterscheidungsmerkmal von Transporten in den Netzwerken des Straßengüterverkehrs liegt in der Regelmäßigkeit bzw. der Frequenz einer Transportdurchführung zwischen zwei Knoten. Hier kann einerseits zwischen **Bedarfs- bzw. Gelegenheitsverkehren** und **Linienverkehre** andererseits unterschieden werden (Bednarczyk 2012, S. 9).

**Linienverkehre** zeichnen sich durch eine gewisse Regelmäßigkeit in der Transportdurchführung aus z.B. täglich oder nur an bestimmten Betriebstagen, einmal oder mehrmals an einem Tag. Linienverkehre sind also an einen festen Fahrplan gebunden. Die Anzahl der Abfahrten in einem bestimmten Zeitraum wird als Taktfrequenz bezeichnet. Transporte im Linienverkehr werden in der Regel während eines Fahrplan-Zeitraums unabhängig von der Auslastung der Transportmittel durchgeführt, die Linienpläne werden jedoch auf Basis der beobachteten Auslastung angepasst. Charakteristisch für diese Verkehre ist daher ein hoher Fixkosten-Beitrag zu den gesamten Betriebskosten eines Netzwerks.

Das Gegenstück des Linienverkehrs ist der **Gelegenheits-bzw. Bedarfsverkehr**, die durch kurz- und mittelfristige Vereinbarungen zwischen dem Versender und dem Logistikdienstleister hervorgerufen werden (Bednarczyk 2012, S. 16). Sie werden vor allem dann genutzt, wenn Linienverkehre für die zu transportierenden Güter überhaupt nicht oder nicht rechtzeitig vorhanden sind oder wenn die Güter das Transportmittel hinsichtlich des Volumens oder Gewichts als Komplettladung auslasten. Diese Verkehre sind im Vergleich zum Linienverkehr durch einen großen Anteil variabler Kosten gekennzeichnet.

Insbesondere die Transportnetzwerke von **Stückgut**-Dienstleistern und **KEP**-Dienstleistern sind durch ein **hohes Maß** an eingerichteten Linienverkehren gekennzeichnet, während Bedarfsverkehre häufig in den Teilladungs- und Komplettladungs-Segmenten Verwendung finden (Bednarczyk 2012; Wieberneit 2008).

---

---

### 3. Methodische Grundlagen

---

*In diesem Kapitel werden die methodischen Grundlagen dargestellt, die für den weiteren Untersuchungsverlauf notwendig sind. Da das im weiteren Verlauf der Arbeit vorgestellte Verfahren zur Optimierung der Ausstattung deutscher Autobahnen mit Systemen zur Energieversorgung von Lastkraftwagen im Kern auf ein mathematisch-formales Modell zurückgreift, werden daher zunächst Grundzüge der Modellbildung thematisiert.*

*In Bezug auf die Planung von Verkehrssystemen hat die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) in der Vergangenheit wichtige Grundlagenarbeit geleistet und so z.B. einen generischen Planungsablauf für Verkehrssysteme vorgeschlagen. Der Planungsprozess für Verkehrssysteme nach Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2001) wird daher ebenfalls in diesem Kapitel beschrieben. Insbesondere die Prozessschritte der Wirkungsabschätzung und Bewertung werden vertiefend behandelt sowie die Modellbildung im Rahmen des Verkehrsplanungsprozesses in ihren Grundzügen thematisiert. Abschließend wird in einem letzten Abschnitt auf eine Methode zur Bewertung des Reifegrades technischer Systeme eingegangen. Abgeschlossen wird das Kapitel mit einem Zwischenfazit.*

#### 3.1. Modellbildung

In diesem Abschnitt werden zunächst einige Theoriebezüge zu den **Grundlagen der Modellbildung** hergestellt. Aufgrund der hohen Anzahl an Veröffentlichungen der verschiedensten wissenschaftlichen Disziplinen mit Bezug zur Modellbildung beschränken sich die folgenden Ausführungen lediglich auf diejenigen Theoriebezüge, die unmittelbar in Zusammenhang mit Untersuchungsgegenstand bzw. der Methodik dieser Arbeit stehen. Daher werden zunächst einige grundlegende Begriffe eingeführt um dann den Prozessablauf bei der Modellbildung vorzustellen.

Daran anknüpfend werden die **Optimierungsmodelle als Modellklasse** in ihrem grundsätzlichen Aufbau, ihrer Zielsetzung und hinsichtlich methodisch bedingter Einschränkungen vorgestellt. Zudem werden **Lösungsverfahren** für diese Modelle klassifiziert. Im Besonderen wird auf Modellformulierungen und Lösungsansätze eingegangen, deren Verständnis für Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** notwendig ist. Abschließend wird die **Simulation im Kontext der Optimierung** als Verfahren zur Ermittlung möglicher Lösungen für ein Optimierungsmodell vorgestellt.

Anschließend wird die **Modellbildung im Kontext der Wirkungsabschätzung im Rahmen des Verkehrsplanungsprozesses** beschrieben (siehe Abschnitt 2.3). Dazu werden verschiedene, in der Verkehrswissenschaft verbreitete Modellklassen wie die **Verkehrsflussmodellierung**, die **Verkehrsnachfragemodellierung** für den **Personenverkehr** sowie für den **Güterverkehr** beschrieben.

---

### 3.1.1. Grundlagen der Modellbildung

Ein **System** besteht, wie an anderer Stelle bereits ausgeführt, aus einer „...Menge von Elementen mit bestimmten Eigenschaften und einer Menge von Beziehungen zwischen diesen Elementen...“ wobei die Menge der Beziehungen als **Systemstruktur** bezeichnet wird (Töllner *et al.* 2010, S. 10). Durch eine möglichst wirkungstreue **Abbildung realer Systemstrukturen** in einem Modell kann das Verhalten des realen Systems beschrieben bzw. nachempfunden werden und so Rückschlüsse aus dem beobachteten Modellverhalten auf die Wirklichkeit gezogen werden. Daher sind Modelle, „...Strukturierungsinstrumente, die helfen, interessierende Phänomene, Systeme oder Systembereiche zu beschreiben und handhabbar zu machen“ (Holzmüller und Bandow 2010, S. VII).

**Modelle** ermöglichen also die **Darstellung realer Systeme** und darüber hinaus **experimentelle Versuche** mit ihnen, falls Experimente am realen System entweder zu umfangreich, zu komplex, zu gefährlich oder zu kostenintensiv wären bzw. zu lange dauern würden (Bungartz *et al.* 2013, S. 2ff; Töllner *et al.* 2010). Der Modellbildung bzw. der Modellanwendung als disziplinübergreifendes Instrument zur Bewältigung von wissenschaftlichen und praktischen Aufgabenstellungen kommt aus diesem Grund in vielen Wissenschafts-Disziplinen eine große Bedeutung zu (siehe z.B. Bandow und Holzmüller 2010; Bungartz *et al.* 2013).

Unabhängig von ihrem jeweiligen wissenschaftlichen oder praktischen Kontext weisen **Modelle drei grundlegende gemeinsame Merkmale** auf (Stock und Bernecker 2014; Braun und Saam 2015; Bonart und Bär 2018). Die erste und **zentrale Eigenschaft** von Modellen ist die Abbildung von realen oder künstlichen Objekten, Phänomenen oder Systemen, was als **Abbildungsmerkmal** bezeichnet wird. Ziel der Modellbildung ist es demnach, die Realität mittels geeigneter Darstellungsformen besser zu verstehen und handhaben zu können.

Eng verknüpft mit dieser Abbildungsfunktion ist eine Vereinfachung des Phänomens bzw. Systems, das sog. **Verkürzungsmerkmal** als zweites universelles Merkmal von Modellen. Bei der Modellbildung werden nur diejenigen Attribute erfasst, die für die spezifische Aufgabenstellung relevant sind, um dadurch die Komplexität zu reduzieren. Häufig werden strukturerhaltende bzw. strukturähnliche aber nicht strukturgleiche Modelle eingesetzt, die aus Gründen der Vereinfachung bestimmte, in der Realität auftretende Systemelemente vernachlässigen bzw. zusammenfassen. (Scholl *et al.* 2008, S. 36). Modelle sind also immer vereinfachte Abbilder der Realität und bieten den Vorteil, nicht in häufig komplexe Systeme eingreifen zu müssen, um kausalen Wirkungszusammenhänge innerhalb einer Systemstruktur näher zu untersuchen (Stachowiak 1973, S. 131–133). Mit Blick auf komplex-adaptive Systeme kommt dem Verkürzungsmerkmal bei der Auswahl der abzubildenden Elemente bzw. Kausalbeziehungen eine große Bedeutung zu.

Eine dritte, wichtige Eigenschaft von Modellen ergibt sich aus ihrer **Zweckorientiertheit** (Töllner *et al.* 2010, S. 8ff). Modelle sind nicht zweckfrei, sondern werden mit einem bestimmten erwarteten Nutzen und zur Erreichung spezifischer wissenschaftlicher und praktischer Zwecke eingesetzt (sog. **pragmatisches Merkmal**). Dieser situationsspezifische Anwendungskontext eines Modells, der als Beziehungsdreieck dargestellt werden kann, ist in Abbildung 3-1 auf der folgenden Seite dargestellt.

---

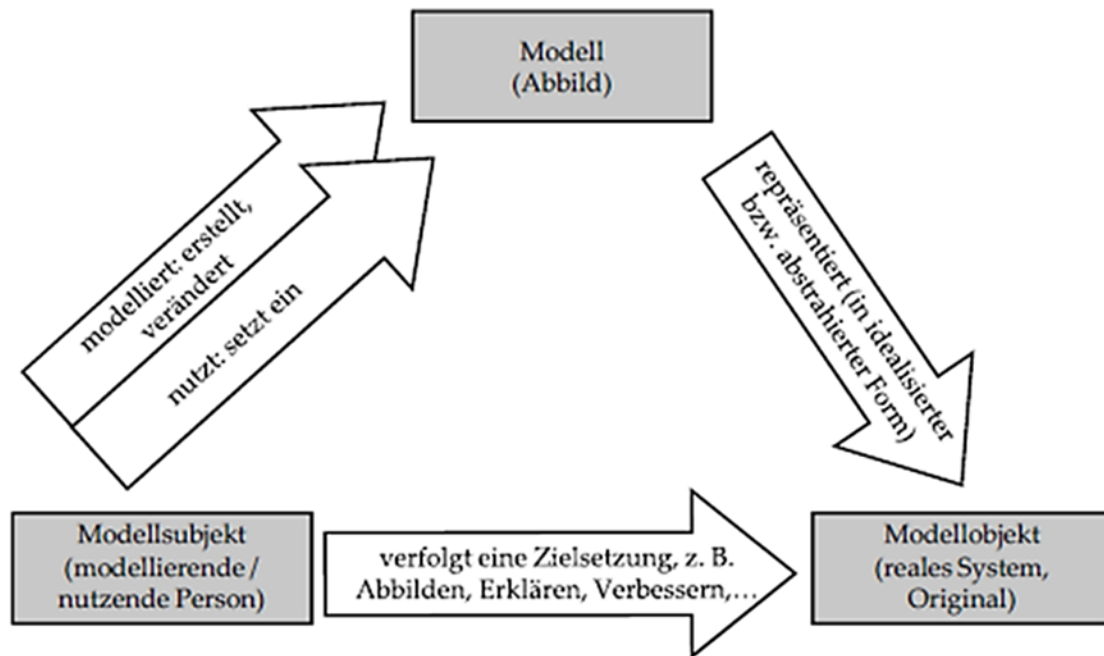


Abbildung 3-1: Beziehungsdreieck bei der Modellbildung  
(Quelle: Töllner *et al.* 2010, S. 10).

Ein Modell repräsentiert ein reales System bzw. ein Vorbild aus der realen Welt in einer abstrakten bzw. vereinfachten Form, das sog. **Modellobjekt**. Ein **Modellsubjekt**, d.h. die modellierende bzw. anwendende Person oder eine Personengruppe, erstellt dieses Modell bzw. wendet es an um damit bestimmte Ziele, die sich aus einer konkreten wissenschaftlichen bzw. praktischen Fragestellung ergeben, zu erreichen.

Aus der **Zielsetzung des Modellsubjekts** ergeben sich eine Reihe wichtiger Entscheidungen bzw. Vorfestlegungen hinsichtlich der Gestaltung des Modells z.B. welcher Realitätsausschnitt abgebildet werden soll. Der sich aus der Zielsetzung des Modellsubjekts ergebende **Modellzweck** ist daher z.B. bereits bei der Abgrenzung eines Systems, d.h. bei der Definition des Modellobjekts, zu berücksichtigen. Zusätzlich sind **explizit formulierte** oder **implizite Annahmen** und der gesamte Modellbildungsprozess vor diesem Hintergrund zu bewerten und die Modellergebnisse insbesondere in Bezug auf deren Übertragbarkeit auf ähnliche Fragestellungen kritisch zu reflektieren.

---

### 3.1.2. Klassifikation von Modellen

In den letzten Jahrzehnten wurde eine Vielzahl von Modelltypen für die verschiedensten realen Probleme in der Literatur präsentiert genauso wie Vorschläge zur **Klassifikation dieser Modelltypen**. Die Modell-Klassifikationen unterscheiden sich zwischen den verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen recht deutlich (Jockisch und Rosendahl 2010). Aus diesem Grund soll an dieser Stelle lediglich zwei weit verbreitete Klassifikationen verschiedener Modelltypen vorgestellt werden, die sich für das Verständnis der Ausführungen bzw. den weiteren Verlauf der Untersuchung besonders eignen.

Eine speziell in den Ingenieurwissenschaften und der Informatik weit verbreite Klassifikation nutzt den **Einsatzzweck eines Modells** als dessen Klassifikationsmerkmal (Boltze *et al.* 2007; Scholl *et al.* 2008; Jockisch und Rosendahl 2010). Hiernach lassen sich die folgenden Modelltypen unterscheiden:

- **Beschreibungsmodelle**, welche Strukturen, Zusammenhänge und Prozesse beschreiben
- **Modelle der Datenanalyse**, die Zusammenhänge innerhalb von Datensammlungen beschreiben
- **Erklärungsmodelle**, die formale, kausale und zeitliche Zusammenhänge eines Systems darstellen
- **Prognosemodelle**, die voraussichtliche Entwicklungen abschätzen
- **Optimierungsmodelle**, die (näherungsweise) optimale Lösungen als Entscheidungshilfe berechnen
- **Bewertungsmodelle**, welche einen aus mehreren Vorschlägen zur Entscheidungsfindung auswählen

Eine weitere **Klassifikation** geht **mehrstufig** vor und ist in Abbildung 3-2 auf der folgenden Seite abgebildet. Klassifiziert wird hier zunächst auf ein **ersten Ebene** nach dem **Abbildungsmedium** (Page 1991, S. 5ff; Page *et al.* 2005). Während die Klasse der materiellen Modelle vereinfachte, physisch greifbare Abbilder des Modellobjekts umfasst (z.B. Prototypen), zählen zu den immateriellen Modellen abstrakte, nicht physisch greifbare Repräsentationen eines Modellobjekts.

Auf einer **zweiten Stufe** lässt sich die Klasse der immateriellen Modelle dann nach ihrem **Formalisierungs- bzw. Mathematisierungsgrad** in formale und informale Modelle unterscheiden. Die informalen Modelle können weiterhin unterteilt werden in verbale und grafisch-deskriptive Modelle. Letztere beschreiben Modellobjekte, meist Systeme, mit Hilfe graphischer Repräsentationen von realen Objekten bzw. Systemelementen und deren Beziehungen untereinander. Beispiele dafür sind Vorgehensmodelle wie z.B. der Verkehrsplanungsprozess oder Flussdiagramme aber auch das Beziehungsdreieck der Modellbildung in Abbildung 3-1 (Thomas 2001). Verbale Modelle hingegen bilden Modellobjekte mittels sprachlicher und/oder graphischer Symbole ab, ein Beispiel für ein verbales Modell ist eine Begriffsdefinition.

---



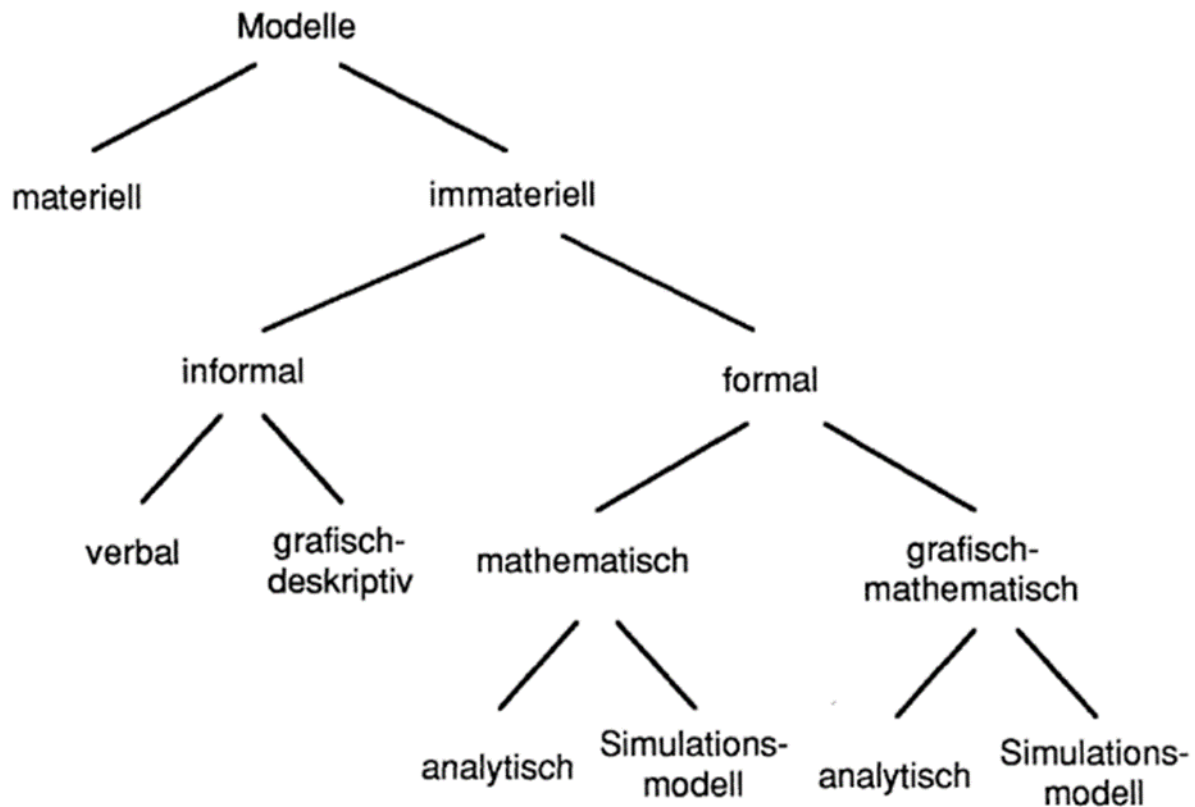


Abbildung 3-2: Klassifizierung von Modellen  
(Quelle: Page *et al.* 2005).

Die Klasse der **formalen Modelle** kann in **mathematische** und **grafisch-mathematische Modelle** unterteilt werden. Die **mathematischen Modelle** umfassen einerseits geschlossen analytische Modellierungsansätze wie z.B. Optimierungsmodelle, lineare Gleichungssysteme, oder Differentialgleichungssysteme. Andererseits gehören Modellierungsansätze der Simulation dieser Klasse an. „Die Simulation ist ein Verfahren, bei dem für ein reales oder imaginäres System ein Modell erstellt wird, das experimentell untersucht werden kann mit dem Ziel, neue Erkenntnisse über das System zu gewinnen und daraus Handlungsanweisungen abzuleiten.“ (Hedtstück 2013, S. 2). Beispiele für unterschiedliche Modellierungsansätze der Simulation sind z.B. die ereignisorientierte Simulation, die zeit- oder periodenorientierte Simulation, die prozessorientierte Simulation oder die agentenbasierte Simulation (Hedtstück 2013, S. 21ff; Weyer und Roos 2017).

**Grafisch-mathematische Modelle**, die neben einer formal-mathematischen Komponente vor allem auch auf die Visualisierung einen Schwerpunkt legen, können ebenfalls in analytische bzw. Simulationsmodelle unterteilt werden. Zu den Simulationsmodellen dieser Klasse zählen z.B. die Modellierung von Petri-Netzen (Priese und Wimmel 2008). Analytische Modelle dieser Klasse basieren zumeist auf der Graphentheorie und umfassen z.B. die soziale Netzwerkanalyse oder die Optimierung in Graphen (Ng und Soo 2018, S. 57-71; Dempe und Schreier 2006, S. 231-267).



Zur Lösung spezifischer realer Probleme (die wiederum auch in Problemklassen eingeteilt werden können) eignet sich nicht jede Modellklasse gleichermaßen. Daher wurde eine Reihe von **Vorgehensmodellen zur modellbasierten Problemlösung** erarbeitet und publiziert. Ein solches Vorgehensmodell in Abbildung 3-3 dargestellt (Boltze *et al.* 2007).

Ausgangspunkt des Vorgehensmodells ist zunächst die **Identifikation** des zu **lösenden Problems** aus der realen Welt, also eine nähere Charakterisierung des Modellobjekts. Anschließend erfolgt eine **Einordnung** in eine allgemeinere **Problemklasse**, die dann wiederum einer oder mehreren **Modellklassen** zugeordnet werden kann. Zur Bearbeitung der realen Probleme innerhalb einer Problemklasse kommen in der Regel mehrere Modellklassen in Frage. Darüber hinaus gibt es auch für jedes **Modell** eine oder mehrere **Methoden**, welche typischerweise angewendet werden, die dann in einer eigenen Methodenklasse zusammengefasst werden. Die **Auswahl** einer oder mehrerer **Methoden** für ein Problem erfolgt durch ein **hierarchisches Vorgehen**: Eine Methodenklasse setzt sich aus mehreren Methodengruppen zusammen, welche jeweils Methoden zur Lösung beinhalten. Anhand der konkreten Modellierung des Problems kann dann aus einer Methodengruppe eine spezifische Methode gewählt werden. Die gewählte **Methode** bzw. das Modell werden dann an die **Erfordernisse** des realen **Problems angepasst** und angewendet, wodurch ein **Verfahren** entsteht.

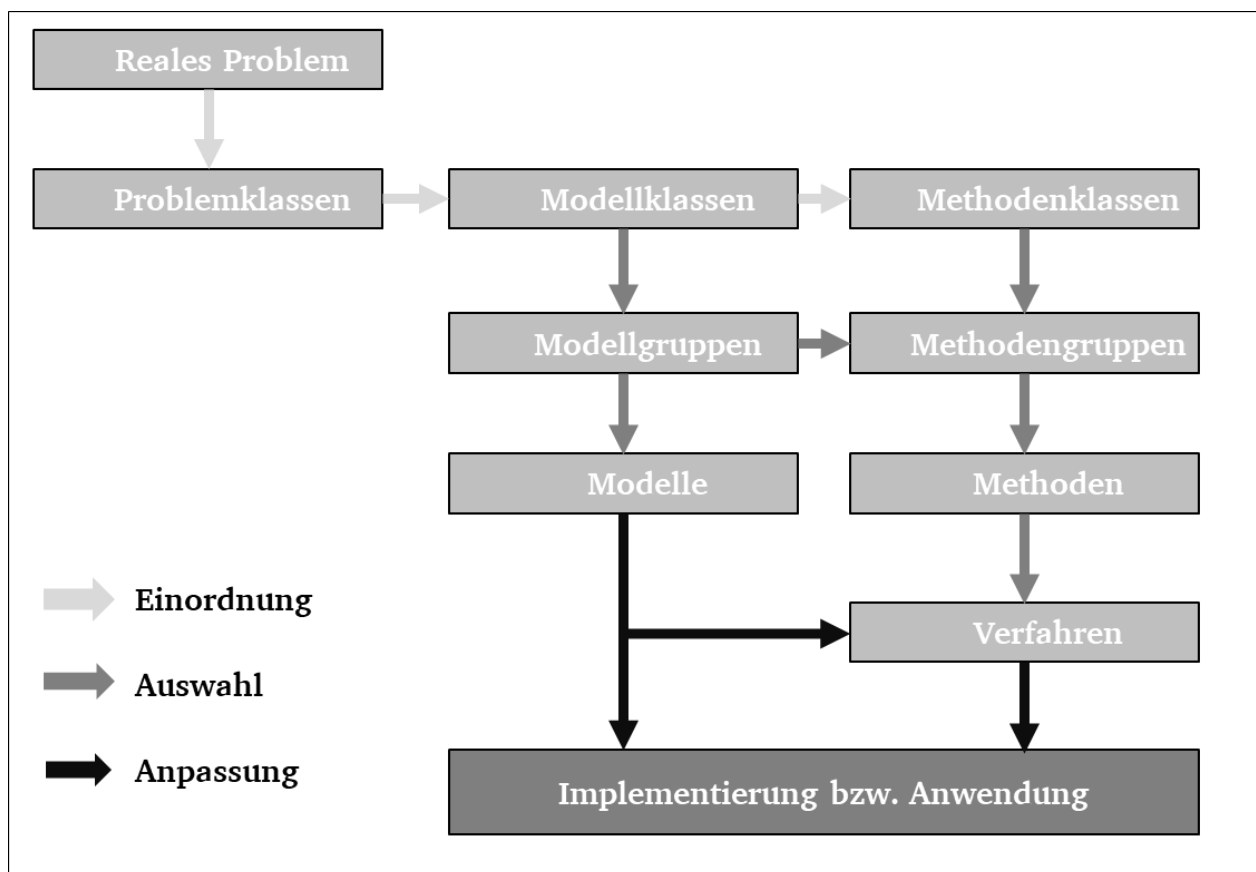


Abbildung 3-3: Vorgehen zur modellbasierten Problemlösung  
(Quelle: eigene Darstellung basierend auf Boltze *et al.* 2007).

---

Zur Bearbeitung des in Abschnitt 1.1 skizzierten Problems bzw. zur Erreichung der in Abschnitt 1.2 definierten Forschungsziele eignet sich die **Klasse formal-mathematischen Modelle**, da das zu lösende Problem wohl strukturiert und durch quantitative Parameter gut zu beschreiben ist. Zudem können Kausalbeziehungen beschrieben und weitgehend auch quantifiziert werden.

Die Ermittlung des optimalen Ausstattungsgrads deutscher Autobahnen mit Systemen zur Energieversorgung von Lastkraftwagen während der Fahrt lässt sich außerdem aus einem theoretisch-methodischen Blickwinkel als ein Problem auffassen, das sich mittels analytischer Modelle lösen lässt. Aus diesem Grund soll die Modellklasse der Optimierungsmodelle im folgenden Abschnitt näher charakterisiert werden.

---

### 3.1.3. Optimierungsmodelle

Optimierungsmodelle sind **formale Repräsentationen** eines in der Realität vorkommenden **Entscheidungs- oder Planungsproblems**. Optimierungsmodelle werden mit dem Ziel eingesetzt, „...mit geeigneten Verfahren optimale Optimierung in diesem Kontext also das Finden derjenigen Alternative, die in Bezug auf die Zielfunktion einen im mathematischen Sinne minimalen bzw. maximalen Wert aufweist (Suhl und Mellouli 2013; Baudach *et al.* 2013, S. 331ff). Die Entwicklung möglichst effizienter Lösungsverfahren für Optimierungsmodelle dieser Art ist wohl der wichtigste Forschungsgegenstand des *Operations Research* (Zimmermann 2008).

#### 3.1.3.1. Aufbau von Optimierungsmodellen

Ein **Optimierungsmodell** besteht in der Regel aus **drei wesentlichen Elementen** (Suhl und Mellouli 2013; Domschke *et al.* 2015). Die ersten beiden Elemente sind einerseits eine **Menge an Variablen** und andererseits einer **Menge an Nebenbedingungen**, die gemeinsam bestimmte Handlungsalternativen in der Realität repräsentieren. Das dritte Element bildet eine **Zielfunktion**, die die einzelnen Handlungsalternativen hinsichtlich ihres Beitrags zu einem Zielsystem bewertet. In der Zielfunktion werden diejenigen **Ziele des Modellspekts** abgebildet, die es in Bezug auf die Lösung einer realen Entscheidungssituation bzw. einer realen Problemsituation verfolgt. Aus diesem Grund müssen diese Ziele im Rahmen des Vorgehens bei der Modellbildung klar definiert und quantifizierbar sein.

Die Zielfunktion muss **im zulässigen Wertebereich** der Variablen (zulässige Lösungsmenge) unter Einhaltung aller Nebenbedingungen **optimiert** werden um dadurch mindestens eine **bestmögliche Lösung** für das beschriebene, reale Problem zu bestimmen. Formal ist eine allgemeine Formulierung eines Optimierungsmodells in Formel 2-1 dargestellt (Domschke *et al.* 2015, S. 4-5; Koop und Moock 2018, S. 13-14).

$$\max/\min \quad z = f(x) \mid x \in X \quad (2-1)$$

$$g_i(x) \begin{cases} \geq 0 \\ \leq 0 \\ = 0 \end{cases} \quad \forall i = 1, \dots, m$$

$$x \in W_1 \times W_2 \times \dots \times W_n, W_j \in \{R_+, Z_+, B\} \forall j = 1, \dots, n$$

---

Ein sogenanntes **globales** Minimum (bzw. Maximum) der Zielfunktion  $f(x^*)$  liegt dann vor, wenn gilt:

$$f(x^*) = \min/\max \{ f(x) \mid x \in X \} \quad (2-2)$$

während ein **lokales** Minimum (bzw. Maximum)  $x_0$  die Zielfunktion nur in einer Umgebung  $U(x_0)$  von  $x_0$  minimiert bzw. maximiert:

$$f(x_0) = \min/\max \{ f(x) \mid x \in U(x_0) \} \quad (2-3)$$

Mit Blick auf die oben beschriebenen Entscheidungsmodelle sind Optimierungsmodelle ein spezieller Fall dieser Modellklasse. Lassen sich reale **Entscheidungsprobleme durch Optimierungsmodelle** abbilden, werden diese Probleme daher auch häufig als **Optimierungsprobleme** beschrieben (Schwenkert und Stry 2015).

In der Regel werden aus Sicht des Modellsubjekts **negative Aufwandsgrößen** durch eine Aufnahme in die Zielfunktion **minimiert** (z.B. monetäre Kosten, Distanzen in Verkehrsnetzen, Ertragsrisiken oder Projektdauern in Netzplänen). **Positive Nutzengrößen** (z.B. Deckungsbeiträge, Gewinne, Ertragschancen oder Emissionseinsparungen) sollen hingegen oft **maximiert** werden (Dempe und Schreier 2006). Alle Ziele des Modellsubjekts, die nicht in die Zielfunktion aufgenommen worden sind, werden auch nicht beim Auffinden der bestmöglichen Handlungsalternative beachtet. Zur Berücksichtigung solcher Ziele sowie zur Abbildung verschiedener Umweltzustände müssen gegebenenfalls nach Durchführung eines Optimierungsexperiments **ergänzende Analysen** oder weitere Berechnungen durchgeführt werden. **Optimierungsmodelle** können daher auch erste **Eingangsparameter** für weitere Untersuchungen mit **anderen Modelltypen** ermitteln. So kann ein Optimierungsmodell z.B. Eingangsparameter für eine Simulation liefern, die dann das Optimierungsergebnis auf Robustheit gegenüber stochastischen Einflüssen untersucht.

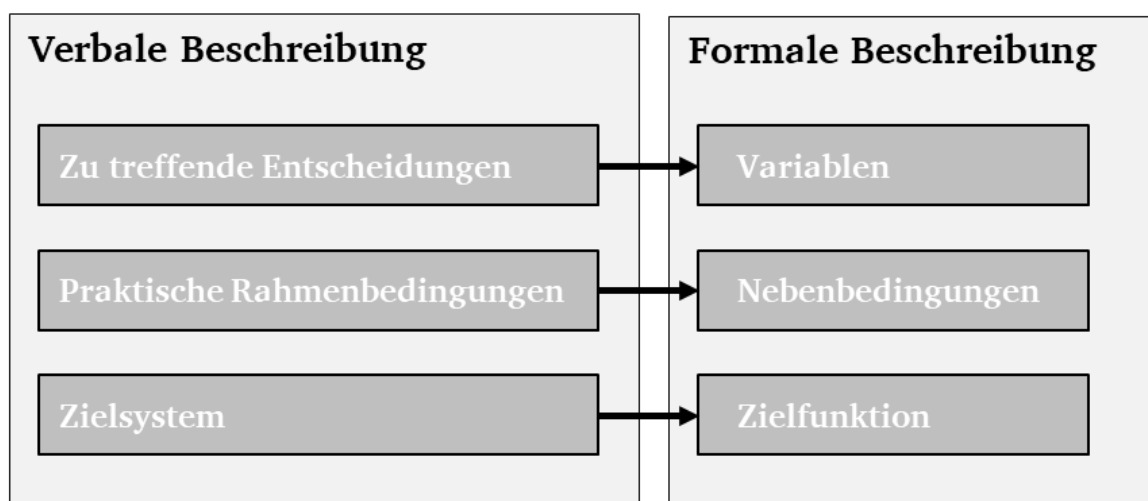


Abbildung 3-4: Überführung der Systembeschreibung in ein mathematisches Modell  
(Quelle: eigene Darstellung basierend auf Baudach *et al.* 2013, S. 332).

---

Die **Handlungsalternativen** des Modellsubjekts sind implizit durch die **Menge der Nebenbedingungen und Variablen** gegeben, was aus Abbildung 3-4 ersichtlich wird (Baudach *et al.* 2013, S. 332ff). Dazu wird ein **Wertebereich** für die einzelnen Variablen festgelegt, der entweder kontinuierlich, ganzzahlig oder binär sein kann (Domschke *et al.* 2015 S. 4). Die **Nebenbedingungen** werden in **Gleichungen bzw. Ungleichungen** formal beschrieben. Mit der Formulierung dieser Nebenbedingungen verbindet das Modellsubjekt also das Ziel, die Gesamtheit der Restriktionen zu formulieren, die von der auf Basis des Zielsystems bewerteten, optimalen Handlungsalternative (die aus mathematischer Sicht eine zulässige Lösung des Modells ist) eingehalten werden muss. Die **Handlungsalternativen** sind dem Modellsubjekt also im Gegensatz zu anderen Modelklassen bzw. -gruppen **ex ante nicht bekannt** oder müssen durch das Modellsubjekt definiert werden.

Die **Zielfunktion** eines **Optimierungsmodells** kann als ein, in einer **Methode zur Wirkungsermittlung** integriertes **Modul zur Bewertung** interpretiert werden bzw. als **Bewertungsmodell** im Sinne der Ausführungen in Abschnitt 3.2.3. Die Nebenbedingungen stellen also gemeinsam mit den Variablen in diesem Sinne die zu bewertenden Handlungskonzepte dar. Die Zielfunktion bewertet also die Wirkungen dieser Handlungskonzepte vor dem Hintergrund eines zumeist multikriteriellen Zielsystems.

---

### 3.1.3.2. Vorgehen zur Bildung von Optimierungsmodellen

Zur **Lösung** einer realen Problemstellung mittels eines **Optimierungsmodells** bietet sich ein strukturiertes, **mehrstufiges Vorgehen** an, das in Abbildung 3-5 auch grafisch dargestellt ist (Werners 2013, S. 2). Das dargestellte Vorgehen wird, im Sinne der Planung als einem kontinuierlichen Prozess, nicht nur einmal durchlaufen wird, um die Lösung des realen Problems zu bestimmen. Vielmehr wird durch die Strukturierung, die für die Aufstellung eines Modells erforderlich ist, das reale Problem besser analysiert.

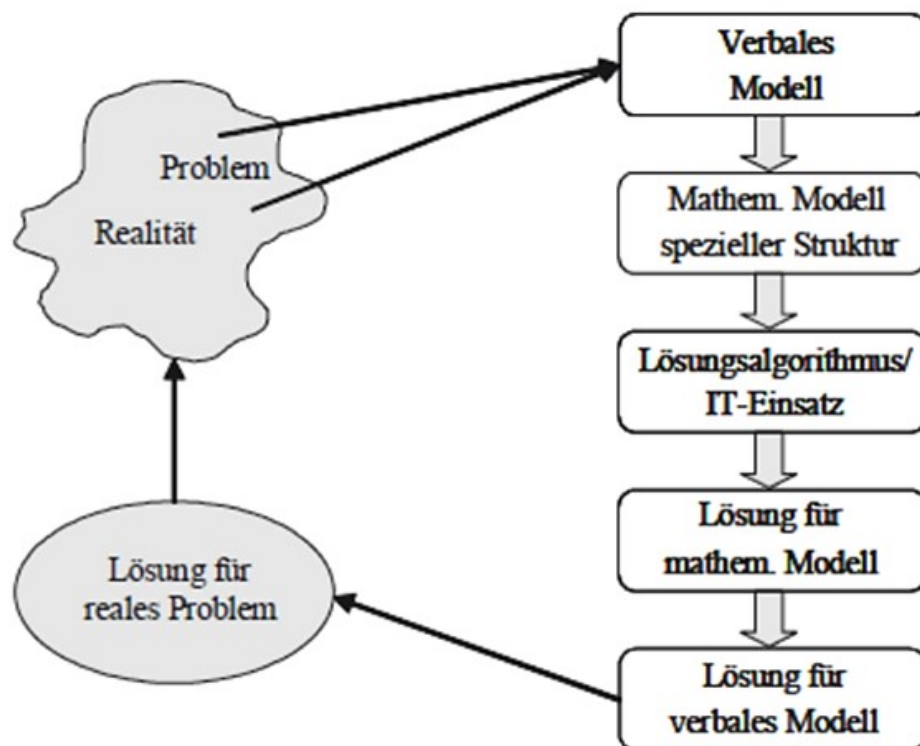


Abbildung 3-5: Vorgehen bei der Bildung von Optimierungsmodellen  
(Quelle: eigene Darstellung basierend auf Werners 2013, S. 2).

Wie aus dieser Abbildung ersichtlich wird, ist der **Ausgangspunkt** dieses Vorgehensmodells ein **reales Problem**. Bezogen auf den Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit ist dies z.B. die Frage nach dem optimalen Ausstattungsgrad deutscher Autobahnen mit Systemen zur Energieversorgung von Lastkraftwagen während der Fahrt. Hinsichtlich des realen Problems werden in einem ersten Schritt zunächst die alle relevanten Aspekte wie z.B. die Ziele, zu treffende Entscheidungen sowie zu berücksichtigende Regeln und Restriktionen widerspruchsfrei und vollständig erfasst (Baudach *et al.* 2013, S. 329ff). Diese Arbeiten münden in einer **verbalen Beschreibung des realen Problems**. Zusätzlich sollte bereits an dieser Stelle geklärt werden, ob alle für die Modellanwendung benötigten Daten in der notwendigen Aggregation verfügbar sind. Sollte dies nicht der Fall sein, müssen bereits entsprechende Anpassungen an der verbalen Problembeschreibung vorgenommen werden.

---

Basierend auf der verbalen Problembeschreibung wird in einem zweiten Arbeitsschritt ein **formal-mathematisches Modell** aufgestellt, das ein strukturähnliches Abbild der gegebenen Problemstellung darstellt und „... genau auf die zu berücksichtigenden Ziele, Entscheidungen und Regeln ausgerichtet bzw. reduziert ist.“ (Baudach et al. 2013, S. 330). Dazu können einerseits bestehende Modellansätze aufgegriffen und adaptiert werden. Andererseits können auf Basis dieser Standardmodelle neue, spezifische Modelle bzw. -typen entwickelt werden. Das *Operations Research* kennt bereits vielfältige Modellstrukturen, die sich im Kern auf wenige archetypische Standardmodelle zurückführen lassen (Grünert und Irnich 2005a, S. 54-62).

In einem dritten Schritt wird dann ein **geeignetes Lösungsverfahren** für das Optimierungsmodell gewählt (Werners 2013, S. 2). Eine **Vielzahl unterschiedlicher Methoden und Algorithmen** zur Ermittlung optimaler bzw. bestmöglicher Lösungen wurde bislang. Unter Verwendung eines oder mehrerer der exakten bzw. heuristischen Lösungsverfahren wurde eine Reihe von **Softwareumgebungen** entwickelt, die informationstechnische unterstützende Lösung von Optimierungsmodellen gut eignen und daher auch **in Wissenschaft und Praxis breite Verwendung** finden (Duarte et al. 2018b).

In einem vierten Schritt wird, in aller Regel mittels dieser Softwareumgebungen, **eine Lösung für das formale Modell** generiert. Ergänzend werden Szenario- bzw. Sensitivitätsanalysen durchgeführt (Domschke et al. 2015). In einem fünften Schritt wird die Lösung des formalen Modells zu einer **Lösung des verbalen Modells** weiterentwickelt, das verbale Modell kann nämlich ggf. mehr Freiheitsgrade oder ein erweitertes Zielsystem enthalten. Die **Lösung des realen Problems** kann dann in einem letzten Schritt auf Basis der Lösung für das verbale Modell umgesetzt werden. Eine erste optimale Lösung des formalen Modells wird in vielen Fällen für die Umsetzung in der Realität noch nicht geeignet sein. Eine auf diese Lösung gestützte Diskussion liefert jedoch ggf. Hinweise darauf, welche wichtigen realen Zusammenhänge noch nicht ausreichend im Modell berücksichtigt wurden und in einer modifizierten Modellversion abzubilden sind. Auf diese Weise trägt ein wiederholter Modellierungs- und Lösungsprozess zu einer zunehmend besseren Erfassung der Problematik und schließlich zu einer real umsetzbaren, möglichst optimalen Lösung bei. Zur Bearbeitung einer realen Problemstellung kann es daher auch immer mehrere Modelle geben.

### 3.1.3.3. Klassifikation von Optimierungsmodellen

Optimierungsmodelle unterscheiden sich z.B. in der konkreten Ausgestaltung der Zielfunktion, des Wertebereichs der Variablen, deren Lösbarkeit in Abhängigkeit der Größe einer Instanz oder in Bezug auf die Verwendung stochastischer Elemente. Im Folgenden werden daher einige **grundlegende Klassifikationen von Optimierungsmodellen** vorgestellt.

Das in der Literatur wohl am häufigsten verwendete Klassifikationsmerkmal für Optimierungsmodelle stellt auf die **Art der Zielfunktion bzw. der Nebenbedingungen** ab. (Domschke et al. 2015, S. 7ff; Schwenkert und Stry 2015). Modelle der **linearen Optimierung** bzw. der linearen Programmierung (LP) besitzen eine oder mehrere lineare Zielfunktionen und lineare Nebenbedingungen. Zudem ist der Wertebereich der Variablen die Menge der (in der Regel nichtnegativen) reellen Zahlen. Wird der Wertebereich weiter differenziert, können zudem lineare Modelle mit **ganzzahligen** oder **Binärvariablen** sowie **kombinatorische (gemischt-ganzzahlige) Modelle** unterschieden werden

---



---

(Domschke *et al.* 2015, S. 8). Durch das Diskretisieren des Wertebereiches sind diese Modelle schwieriger zu lösen als diejenigen mit einer generischen LP-Formulierung, Lösungsverfahren wie der Simplex-Algorithmus sind für solche Modelle nicht mehr anwendbar.

Von den linearen Modellen sind die Modelle der sog. **nichtlinearen Optimierung** bzw. Programmierung (NLP) abgrenzbar. Die Modelle dieser Klasse weisen eine nichtlineare Zielfunktion und/oder mindestens eine nichtlineare Nebenbedingung auf. NLP-Modelle ermöglichen einerseits in der Regel eine bessere Abbildung realer Probleme als dies lineare Modelle leisten können. So könnten z.B. in einem nichtlinearen Modell Transportkosten in Abhängigkeit von der zu transportierenden Menge und der zurückzulegenden Transportentfernung abgebildet werden. Andererseits wird die genauere Abbildung realer Sachverhalte durch einen im Allgemeinen wesentlich höheren Rechenaufwand erkauft, was insbesondere bei großen Probleminstanzen eine große Herausforderung in Bezug auf die Anwendung bedeutet. Daher wird für solche Modelle häufig ein Ansatz zur schrittweisen Linearisierung (sog. Relaxation bzw. Relaxierung) gewählt (Grünert und Irnich 2005a).

Weiterhin werden Optimierungsmodelle nach deren **Lösbarkeit in Abhängigkeit der Größe einer Instanz** klassifiziert (Grünert und Irnich 2005a S. 74-78; Mattfeld und Vahrenkamp 2014, S. 47- 51). Hier wird einerseits zwischen Modellen unterschieden, die mit polynomialen Rechenaufwand optimal lösbar sind und andererseits solchen, für die bislang kein Verfahren existiert, das jede Instanzgröße mit polynomialen Aufwand optimal lösen kann. Diese Modelle dieser Gruppe werden auch als NP-schwere NP-vollständige Modelle bezeichnet, NP steht hier für nichtdeterministische Polynomialzeit (Suhl und Mellouli 2013, S. 132).

Hinsichtlich der **Abbildung stochastischer Elemente** kann zwischen deterministischen und stochastischen Optimierungsmodellen unterschieden werden (Zhang *et al.* 2012; Grünert und Irnich 2005a). Bei deterministischen Modellen werden die Parameter der Zielfunktion und der Nebenbedingungen als dem Modellsystem bekannt vorausgesetzt. Ist jedoch mindestens ein Parameter in der Realität als Zufallsvariable darstellbar, liegt ein stochastisches Modell vor. Deterministische Modelle dienen also der Entscheidungsunterstützung bei Sicherheit, stochastische Modelle der Entscheidungsunterstützung bei Risiko.

### 3.1.3.4. Lösungsverfahren für Optimierungsmodelle

Lösungsverfahren, die nachweislich in der Lage sind, optimale Werte für die Variablen der Zielfunktion unter Berücksichtigung aller Restriktionen zu finden, werden als **exakte Lösungsverfahren** bezeichnet (Werners 2013, S. 29). Für einige Modellgruppen hingegen ist es nicht mit polynomialen Rechenaufwand möglich, optimale Lösungen zu finden. Um dennoch möglichst gute Lösungen für solche Probleme finden zu können, wurden sogenannte **heuristische Verfahren** (oder kurz Heuristiken) entwickelt. Heuristiken können das Auffinden einer optimalen Lösung zwar nicht garantieren, führen dafür aber meist wesentlich aufwandsärmer zu guten Lösungen. Die mittels heuristischer Verfahren ermittelten Lösungen werden daher auch als Suboptima oder suboptimale Lösungen bezeichnet (Mattfeld und Vahrenkamp 2014, S. 50). Eine Klassifikation verschiedener exakter und heuristischer Lösungsverfahren zeigt Abbildung 3-6.

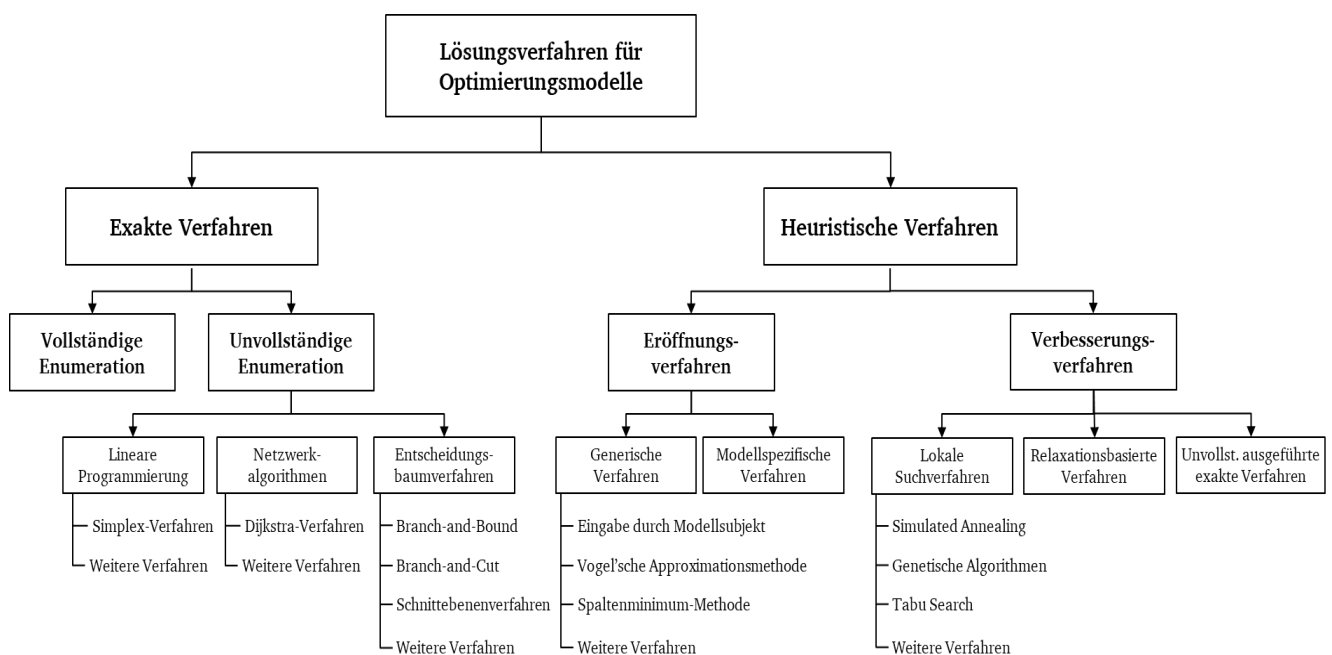


Abbildung 3-6: Übersicht der Lösungsverfahren für Optimierungsmodelle  
(Quelle: eigene Darstellung).

#### Exakte Verfahren

Die exakten Verfahren werden häufig auch als Optimierungsverfahren bezeichnet. Exakte Verfahren gewährleisten, dass in endlich vielen Schritten unter allen zulässigen Lösungen der Zielfunktion unter Berücksichtigung aller Nebenbedingungen eine optimale Lösung für das gegebene Optimierungsmodell gefunden wird (Domschke und Scholl 2006, S. 2). Zu den exakten Verfahren zählt als wohl intuitivstes Verfahren die **vollständige Enumeration** des Lösungsraums: alle möglichen Wertkombinationen der Variablen werden abgearbeitet. Durch den hohen Rechenaufwand ist die vollständige Enumeration nur bei sehr kleinen Probleminstanzen anwendbar (bei  $n$  Variablen mit  $k$  möglichen Werten ergeben sich  $k^n$  mögliche Lösungen).

---

Demgegenüber stehen Verfahren der begrenzten oder **unvollständigen Enumeration**, bei der die Menge aller möglichen Lösungen in mehrere Teilmengen zerlegt wird und dominierte Teilmengen nach bestimmten Regeln eliminiert werden. Die übrigen Teilmengen werden bezüglich der optimalen Lösung weiter durchsucht. Bei den Verfahren der unvollständigen Enumeration sind die Lineare Programmierung, Netzwerkalgorithmen und Entscheidungsbaumverfahren als Kategorien zu nennen.

Zur Lösung linearer Optimierungsmodelle (d.h. mit linearer Zielfunktion und Nebenbedingungen sowie dem Wertebereich der reellen Zahlen für alle Variablen bzw. Parameter) eignen sich die Verfahren der **linearen Programmierung**. Unter diesen Verfahren ist das aus der Numerik stammende Simplex-Verfahren der wohl prominenteste Vertreter (Opitz 2009, S. 241 ff). Die Grundidee des Simplexverfahrens wurde bereits 1947 von George Dantzig vorgestellt und hat sich durch zahlreiche Verbesserungen zum wichtigsten Lösungsverfahren der linearen Optimierung in der Praxis entwickelt (Dantzig 1987). Mit Hilfe des Simplexverfahrens kann neben der exakten Lösung in endlich vielen Schritten auch die Unlösbarkeit eines Modells festgestellt werden.

Zur Lösung von Optimierungsmodellen, die sich auf Probleme in Netzwerken bzw. Graphen beziehen, kommen sog. **Netzwerkalgorithmen** zum Einsatz (Cormen *et al.* 2004; McCormick *et al.* 2014; Suhl und Mellouli 2013, S. 163ff). Typische Problemsituationen, für die diese Verfahren eingesetzt werden, sind z.B. das Finden kürzester Wege oder Netzfluss- bzw. Transportmodelle (Grünert und Irnich 2005b). Für Probleme ersterer Art kommt häufig das sog. Dijkstra- oder Label-Setting-Verfahren zum Einsatz, das besonders ressourceneffizient kürzeste Wege in Netzwerken finden kann (z.B. Mattfeld und Vahrenkamp 2014, S. 77-83). Daneben existieren aber noch weitere Verfahren, die an dieser Stelle nicht weiter vertieft werden sollen.

Für die Lösung kombinatorischer Optimierungsmodelle können häufig **Entscheidungsbaumverfahren** eingesetzt werden (Grünert und Irnich 2005a, S. 110-141). Bei den Entscheidungsbaumverfahren werden optimale bzw. zulässige Lösungen für kombinatorische Probleme innerhalb einer sich auffächernden Baumstruktur gesucht. Zu diesen Verfahren zählen das Branch-and-Bound-Verfahren, das Schnittebenen-Verfahren, das Branch-and-Cut-Verfahren, das Column-Generation-Verfahren, die Dynamische Optimierung und weitere Verfahren. Auch hier wird aus Gründen der Zweckmäßigkeit auf eine tiefergehende Vorstellung der einzelnen Verfahren verzichtet.

## Heuristische Verfahren

Heuristische Verfahren bzw. Heuristiken sind „...Vorgehensweisen zur Ermittlung guter zulässiger Lösungen von Optimierungsmodellen, mit Hilfe derer man reale Entscheidungsprobleme mathematisch abbilden kann“ (Domschke und Scholl 2006, S. 2). Die Begriffsbezeichnung Heuristik hat ihren Ursprung im griechischen Wort „*heuriskein*“, was sich sinngemäß mit „*Anleitung, um auf methodischem Wege zur Erkenntnis zu gelangen*“ übersetzen lässt (Pomberger und Dobler 2008, S. 394). Daraus lässt sich schon das grundlegende Funktionsprinzip von heuristischen Verfahren erkennen: sie gehen zum **Finden oder Verbessern von Lösungen nach bestimmten Regeln** vor, die in der Regel die Kenntnis des Modellsubjekts der Modellstruktur ausnutzen.

**Ziel** des Einsatzes von **Heuristiken** ist es, entweder **möglichst schnell** zu einer **akzeptablen Lösung** oder in **akzeptabler Zeit** zu einer **möglichst guten Lösung** zu gelangen (Grünert und Irnich 2005a, S.182). Im Unterschied zu den exakten Verfahren können Heuristiken die Optimalität einer Lösung nicht

---

feststellen und somit auch nicht garantieren. Heuristiken stellen daher stets einen **Kompromiss zwischen Ressourcenaufwand** (Speicherkapazität, Rechnerleistung bzw. Laufzeit) und erzielter **Lösungsgüte** dar. Heuristiken lassen sich weiter in Eröffnungsverfahren und Verbesserungsverfahren unterteilen (Domschke *et al.* 2015, S. 127ff).

**Eröffnungs- oder Konstruktionsverfahren** dienen der Bestimmung einer ersten zulässigen Lösung des betrachteten Optimierungsmodells (Koop und Moock 2018, S. 119). In aller Regel ist diese erste zulässige Lösung für das Optimierungsmodell weder eine optimale noch eine suboptimale Lösung, jedoch kann basierend auf dieser ersten zulässigen Lösung nach besseren Lösungen im Hinblick auf die Zielfunktion gesucht werden. Für fast alle Modellgruppen geeignete, generische Eröffnungsverfahren sind z.B. die Eingabe einer zulässigen Basislösung durch das Modellsubjekt, die Nordwesteckenregel, die Vogel'sche Approximationsmethode oder die Spaltenminimum-Methode (Domschke *et al.* 2015, S. 89ff). Daneben existieren modellgruppenspezifische Eröffnungsverfahren, wie sie z.B. in großer Zahl für das Tourenplanungsproblem entwickelt worden sind (Ohrt 2008; Grünert und Irnich 2005b). Da speziell bei neueren Eröffnungsverfahren meist auch in beschränktem Rahmen nach zulässigen, besseren Lösungen gesucht wird, ergibt sich ein fließender Übergang zu den Verbesserungsverfahren als weitere Klasse der heuristischen Lösungsverfahren.

Diese **Verbesserungsverfahren** starten zumeist mit einer zulässigen Lösung des Problems, die entweder zufällig oder durch Anwendung eines Eröffnungsverfahrens bestimmt wird (Grünert und Irnich 2005a, S. 127). Verbesserungsverfahren lassen sich in **lokale Suchverfahren**, **relaxationsbasierte Verfahren** und **unvollständig ausgeführte, exakte Verfahren** weiter unterteilen.

Bei den **lokalen Suchverfahren** wird in einer endlichen Anzahl von Iterationsschritten von der gerade betrachteten Lösung zu einer Lösung aus der unmittelbaren Nachbarschaft fortgeschritten. Die Nachbarschaft enthält alle Lösungen, die sich aus der aktuellen Lösung durch eine einmalige Anwendung einer Umwandlungsvorschrift ergeben. Typische Transformationsvorschriften verändern die aktuelle Lösung zumeist an genau einer Stelle. Die einzelnen Verfahren unterscheiden sich bzgl. der Strategien zur Untersuchung der Nachbarschaft und der Auswahl von Iterationsschritten. Hierbei ist einerseits festzulegen, in welcher Reihenfolge die Lösungen in der Nachbarschaft untersucht werden und andererseits, wann zu einer dieser fortgeschritten wird. Die Reihenfolge der Untersuchung kann zufällig oder systematisch bestimmt werden. Ein Fortschreiten kann erfolgen, sobald die erste bessere Nachbarlösung gefunden wird (First-Fit-Strategie) oder nachdem alle Nachbarlösungen untersucht wurden, zur besten aller Nachbarlösungen (Best-Fit-Strategie). Diese stellt für die betrachtete Nachbarschaft ein lokales Optimum dar, deren Zielfunktionswert jedoch deutlich schlechter sein kann als der eines globalen Optimums. Aus diesem Grund erlauben lokale Suchverfahren auch eine zwischenzeitliche Verschlechterung des Zielfunktionswertes um dadurch das Verlassen der Nachbarschaft eines lokalen Optimums zu gewährleisten und die Suche nach einem globalen Optimum einzuleiten. Beispiele für derartige Verfahren sind z.B. Simulated Annealing, Tabu Search, genetische Algorithmen oder das Hill-Climbing-Verfahren.

**Relaxationsbasierte Verfahren** kommen häufig in der kombinatorischen Optimierung zum Einsatz (Domschke und Scholl 2006, S. 7). Im Rahmen der Lösung NP-schwerer Optimierungsmodelle mittels Entscheidungsbaumverfahren wird versucht, das System der Nebenbedingungen weniger restringiert zu gestalten, indem z.B. die Forderung nach Ganzzahligkeit an Variablen in einem linearen Modell aufgehoben wird. Außerdem kann die Verletzung dieser Forderung in die Zielfunktion integriert

---

---

(Lagrange-Relaxation) oder Nebenbedingungen vollständig eliminiert werden. Relaxationsbasierte Verfahren werden häufig eingesetzt um globale untere bzw. obere Schranken für den maximalen bzw. minimalen Zielfunktionswert zu ermitteln. Aus der Lösung einer Relaxation lässt sich durch logisches Folgern häufig eine gute zulässige Lösung des Ausgangsproblems ableiten.

**Unvollständig ausgeführte exakte Verfahren** sind exakte Lösungsverfahren, die nicht vollständig ausgeführt werden, sondern vorzeitig bei Erfüllung eines vorab festgelegten Kriteriums abgebrochen werden (Domschke und Scholl 2006, S. 8). Die ermittelten Lösungen dienen als untere und obere Schranken, was dann wiederum Aussagen über die Güte einer Lösung ermöglicht. Mögliche Abbruchkriterien sind z.B. die Anzahl der durchlaufenen Iterationsschritte, die Abweichung von einer vorgegebenen Lösung, das Überschreiten einer definierten Laufzeit oder das Erreichen eines bestimmten Zielfunktionswerts. Unvollständig ausgeführte exakte Verfahren und relaxationsbasierte Verfahren können auch als Eröffnungsverfahren verwendet werden, enthalten aber bereits Komponenten der Verbesserung einer Lösung.

## Metaheuristiken

Eine **Metaheuristik** ist „.... ein übergeordneter Algorithmus, der die Lösungssuche eines oder mehrerer abhängiger Algorithmen steuert. Sie beruht auf einer Sammlung von (Meta-)Strategien, die unabhängig vom zugrundeliegenden Problem und den abhängig gesteuerten Algorithmen sind.“ (Grünert und Irnich 2005a, S. 188). Charakteristisch für Metaheuristiken ist, dass sie sich auf eine **Vielzahl von Modellen bzw. Problemen** und Nachbarschaftsdefinitionen anwenden lassen um hierfür möglichst gute Lösungen zu finden. Wegen dieser Eigenschaft kommen Metaheuristiken insbesondere im Zuge der simulationsbasierten Optimierung zum Einsatz (siehe Abschnitt 5.6.3).

Metaheuristiken sollen **zyklische Wiederholungen** verhindern und außerdem das Verharren in **lokalen Optima** überwinden. Mit dem Einsatz von Metaheuristiken wird darüber hinaus das Ziel der **Laufzeiteffizienz** auch bei großen Instanzen verbunden, was durch eine iterative Anwendung bestimmter **Such- und Verbesserungsverfahren** (sog. Operatoren) gewährleistet werden soll (Arnold et al. 2008, S. 150). Diese Operatoren basieren häufig auf dem Grundprinzip der lokalen Suche bzw. auf evolutionsbasierten Verfahren, die sich unmittelbar aus dem Genetischen Algorithmus ableiten lassen. Zur Klassifikation von Metaheuristiken existieren einige Ansätze, die sich auf eine Reihe unterschiedlicher Klassifikationsmerkmale stützen (Sergienko et al. 2009; Sadigh et al. 2012; Akerkar und Sajja 2016; Sörensen et al. 2018). Eine, auch visuell anschauliche Klassifikation auf Grundlage in der Literatur häufig verwendeter Klassifikationsmerkmale enthält Abbildung 3-7 auf der nächsten Seite.

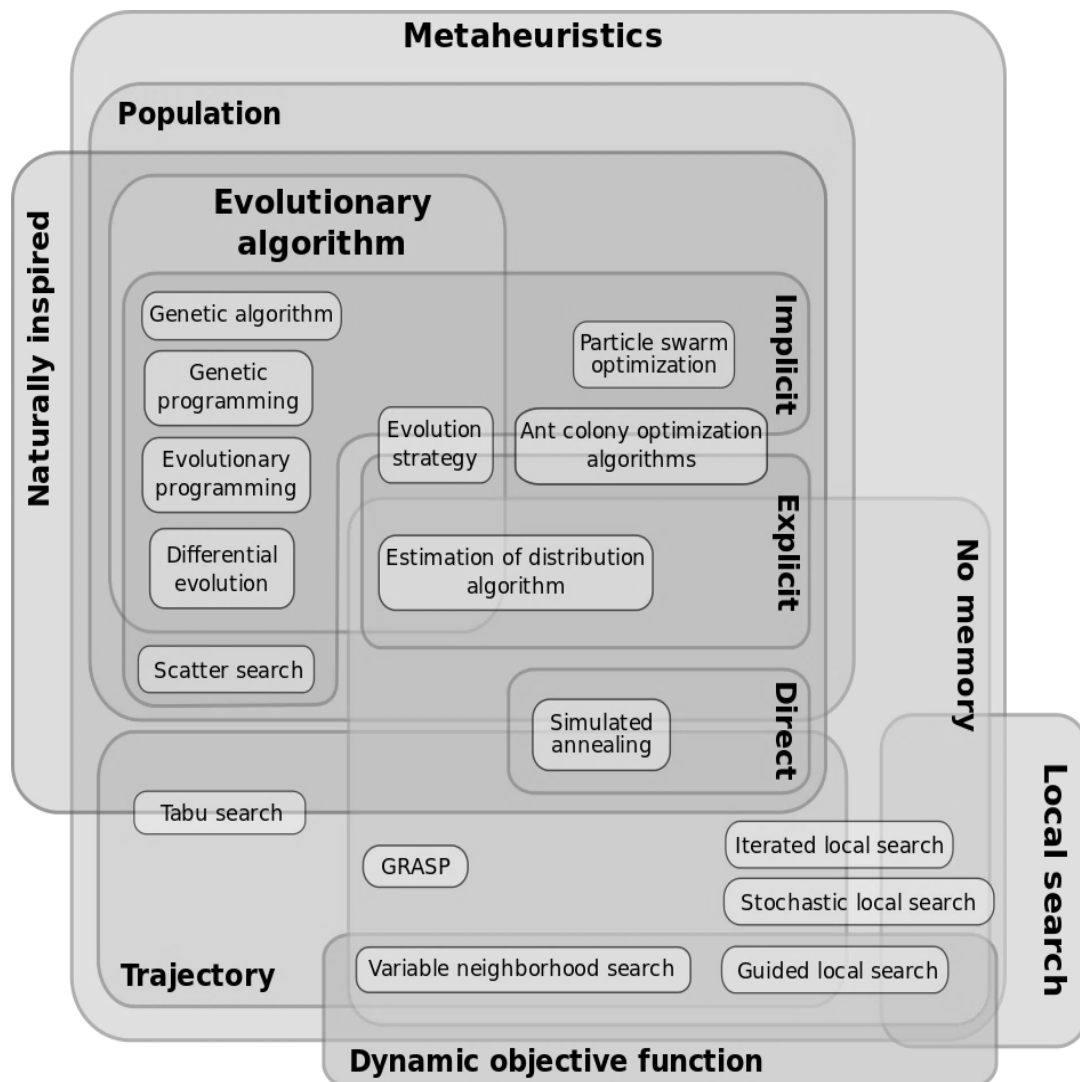


Abbildung 3-7: Klassifikation von Metaheuristiken  
(Quelle: Sadigh *et al.* 2012).

Zum Verständnis der weiteren Ausführungen sind zunächst die Klassen der populations- und trajektorienbasierten Metaheuristiken aus Abbildung 3-7 von besonderem Interesse. Eine **pfad- oder trajektorienbasierte Metaheuristik** errechnet nach bestimmten Regeln in jedem Iterationsschritt eine einzelne Lösung des zugrundeliegenden Optimierungsmodells, auf deren Basis im nächsten Schritt eine neue Lösung bestimmt wird (Sörensen und Glover 2013). Im Ergebnis entsteht so ein Pfad bzw. eine Trajektorie durch den Such- und Lösungsraum, weswegen sich die Bezeichnung etabliert hat. Ein Beispiel für diese Klasse ist das *Simulated Annealing*, bei dem in jedem Iterationsschritt eine neue Lösung in einer Nachbarschaft der bisherigen Lösung ausgewählt und mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit als neuer Zustand akzeptiert wird. Die Akzeptanz-Wahrscheinlichkeit hängt davon ab, ob und wieviel besser oder schlechter die neue Lösung im Vergleich zur alten Lösung ist (Sörensen *et al.* 2018).<sup>16</sup>

<sup>16</sup> Das *Simulated Annealing* (dt. Simuliertes Abkühlen) bildet den Abkühlungsprozess von Metallen nach. Nach Erhitzen eines Metalls sorgt eine langsame und kontrollierte Abkühlung dafür, dass die Atome ausreichend Zeit haben, sich zu ordnen und stabile Strukturen zu bilden, wodurch nach den Gesetzen der Entropie ein energieärmer, nahezu optimaler Zustand erreicht wird (Grünert und Irnich 2005a, S. 211ff).



---

Im Gegensatz zu den trajektorienbasierten Metaheuristiken erzeugen **populationsbasierte Metaheuristiken** in jedem Iterationsschritt viele verschiedene Lösungen, die zusammen eine Population von Lösungen bilden (Feldmann 1999, S. 71-78). Die Population wird in jedem Iterationsschritt nach bestimmten Regeln verändert, wobei einzelne Elemente der Population verschwinden, neue Elemente hinzukommen, verschoben, ersetzt oder auf andere Weise behandelt werden können. Ein bekanntes Beispiel für populationsbasierte Metaheuristiken ist der genetische Algorithmus (Weicker 2007, S. 128ff). Der genetische Algorithmus ahmt die Evolution gemäß dem Prinzip des Überlebens des Stärkeren nach (engl. *survival of the fittest*). Die Stärke bzw. der Fitnessgrad eines Populationselements wird auf Basis einer sog. Fitnessfunktion bewertet. Die auf Basis ihrer Fitnessbewertung schwächeren Mitglieder einer Population werden dort von Iterationsschritt zu Iterationsschritt mit höherer Wahrscheinlichkeit eliminiert, während die verbleibenden Elemente auf verschiedene Weisen untereinander kombiniert und/oder mutiert werden, um die verschwundenen Elemente durch neue Elemente zu ersetzen.

Auf Basis des klassischen Genetischen Algorithmus hat sich innerhalb der Klasse der naturanalogen Metaheuristiken eine bedeutsame Gruppe von Metaheuristiken gebildet, die sog. **evolutionären Algorithmen** (Weicker 2007). Evolutionäre Algorithmen unterscheiden sich hinsichtlich der jeweiligen genetischen Repräsentation, der Fitnessfunktion und den zum Einsatz kommenden genetischen Transaktionen (d.h. Mutation, Rekombination und Selektion). Es existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Ansätze, die wichtigen sind genetische Algorithmen, evolutionäre Algorithmen, genetische Programmierung und evolutionäre Programmierung (Gerdes *et al.* 2004).

### Scatter Search

Eine populationsbasierte und naturanaloge Metaheuristik, die in einigen kommerziellen Optimierungsumgebungen zum Einsatz kommt, ist das sog. **Scatter Search-Verfahren**. Zusätzlich lässt sich das Verfahren sehr gut mit Simulationsmodellen koppeln. Die Scatter Search wurde 1977 entwickelt und 1997 erstmals algorithmisch formuliert (Glover 1977 bzw. 1998). Sie **kombiniert die Vorteile verschiedener heuristischer Methoden** wie der Tabu-Suche oder dem klassischen Genetischen Algorithmus in einem metaheuristischen Referenzrahmen (Laguna 2011; Domschke und Scholl 2006, S. 11-12). Mögliche Lösungen für ein Optimierungsmodell werden im Hauptteil einer Scatter Search durch **naturanaloge Transaktionen** wie Selektion, Rekombination und Mutation erzeugt und schrittweise auf Basis einer Referenzmenge an guten Lösungen unter Anwendung verschiedener heuristischer Verfahren verbessert (Weicker 2007, S. 137ff; Laguna und Martí 2003a; Martí *et al.* 2006).

In einem **ersten Verfahrensschritt** werden zunächst iterationsbasiert mittels der sog. **Diversifikationsmethode** (engl. *diversification generation method*) erste Lösungen, z.B. durch Anwendung eines Eröffnungsverfahrens, für das zugrundeliegende Optimierungsmodell erzeugt, die im Hinblick auf den sich aufspannenden Such- bzw. Lösungsraum möglichst umfassend sein sollten. Je Iterationsschritt wird eine Lösung erzeugt, für die eine Zulässigkeit jedoch noch nicht gefordert wird (Martí *et al.* 2006). Jede durch die Diversifikationsmethode erzeugte Lösung wird dann mittels des zweiten Elements, dem **Verbesserungsverfahren** (engl. *improvement method*) in eine oder mehrere verbesserte Lösungen überführt und zwischengespeichert (Ausgangsmenge P in Abbildung 3-8). Die verbesserten Lösungen sollten dann auch bereits zulässig sein (Du und Swamy 2016, S. 331ff). In Abbildung 3-8 ist der erste Verfahrensschritt im oberen Teil abgebildet.



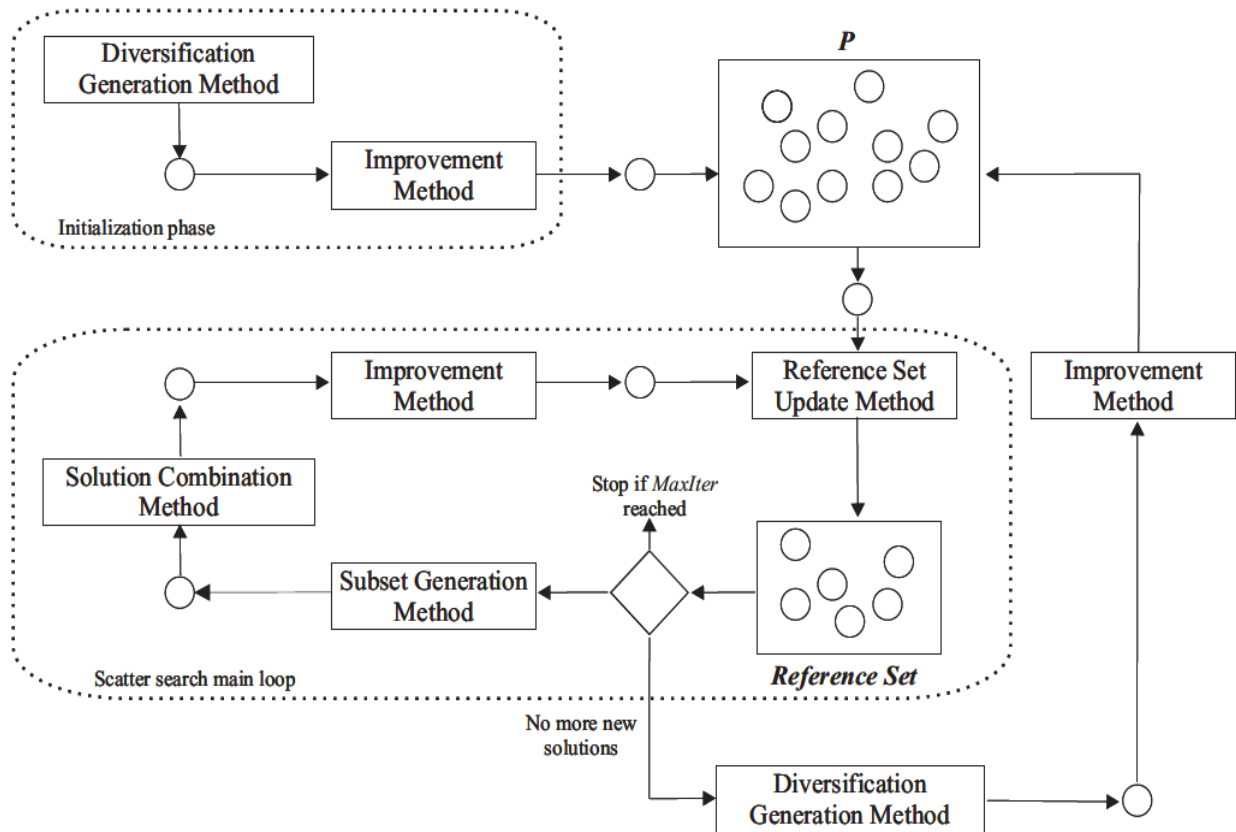


Abbildung 3-8: Grundaufbau einer Scatter Search  
(Quelle: Blanco *et al.* 2009).

Die Ausgangsmenge  $P$  enthält nun vergleichsweise viele Elemente. Mittels der dritten Methode, der **Referenzmengen-Aktualisierungsmethode** (engl. *reference set update method*) werden daher im Allgemeinen 10% der Elemente der Menge  $P$  nach bestimmten Regeln entnommen und in der sog. *Referenzmenge* gespeichert. Zudem regelt die Referenzmengen-Aktualisierungsmethode den effizienten Zugriff der weiteren Verfahrenselemente auf die Referenzmenge (Martí *et al.* 2006, S. 361). Ein Aufnahmekriterium in die Referenzmenge kann neben einem guten Beitrag zur Zielfunktion auch die Diversität einer Lösung im Hinblick auf den sich aufspannenden Such- bzw. Lösungsraum sein. In der Referenzmenge werden die Elemente absteigend nach der Lösungsgüte gespeichert.

Ist die Referenzmenge initialisiert und mit Elementen versehen worden, beginnt der **zweite Verfahrensschritt** einer jeden Scatter Search, der ebenfalls ein iterativer Prozess ist. Die Anzahl der Iterationsschritte ist vorab auf Basis der angestrebten statistischen Sicherheit auf Basis eines Konfidenzintervalls zu bestimmen. Mit Hilfe des vierten Elements, der **Teilmengengenerierungsmethode** (engl. *subset generation method*), wird nun nach bestimmten Regeln eine Teilmenge guter Lösungen aus der Referenzmenge extrahiert. In einem fünften Element, der **Kombinationsmethode** (engl. *solution combination method*), werden weitere Lösungen durch naturanaloge Verfahren auf Basis der Teilmenge erzeugt und dem Verbesserungsverfahren zugeführt. Die so verbesserten Lösungen gehen wieder in die Referenzmenge ein und die Iteration startet erneut.

### 3.1.4. Kopplung von Simulations- und Optimierungsmodellen

**Simulationsmodelle** sind ein weit verbreitetes Werkzeug um **Erkenntnisse über dynamische Systeme**, Zufallsprozesse oder verwandte Modellobjekte zu erlangen. Für eine Simulationsstudie charakteristisch sind neben dem **Abbilden eines realen Sachverhalts** bzw. Problems in einem Modell die Verwendung dieses Modells zur strukturierten **Durchführung von Experimenten** (Werners 2013, S. 258).

Eine **Simulation** ist „... die Nachbildung eines dynamischen Prozesses in einem Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“ (Verband Deutscher Ingenieure 2018, S. 2). Diese Definition lässt sich natürlich auch auf Systeme übertragen: bei einer Simulation werden **an einem abstrakten Abbild der Realität Experimente** durchgeführt, mit dem Ziel, das Systemverhalten zu verstehen und so zukünftige Systemzustände zu prognostizieren, wobei eine Vielzahl **unterschiedlicher Systemzustände** berücksichtigt wird (Suhl und Mellouli 2013, S. 269ff). Das Vorgehen bei einer Simulationsstudie, das dem bei der Entwicklung und Anwendung eines Optimierungsmodells ähnelt, ist in Abbildung 3-9 dargestellt.

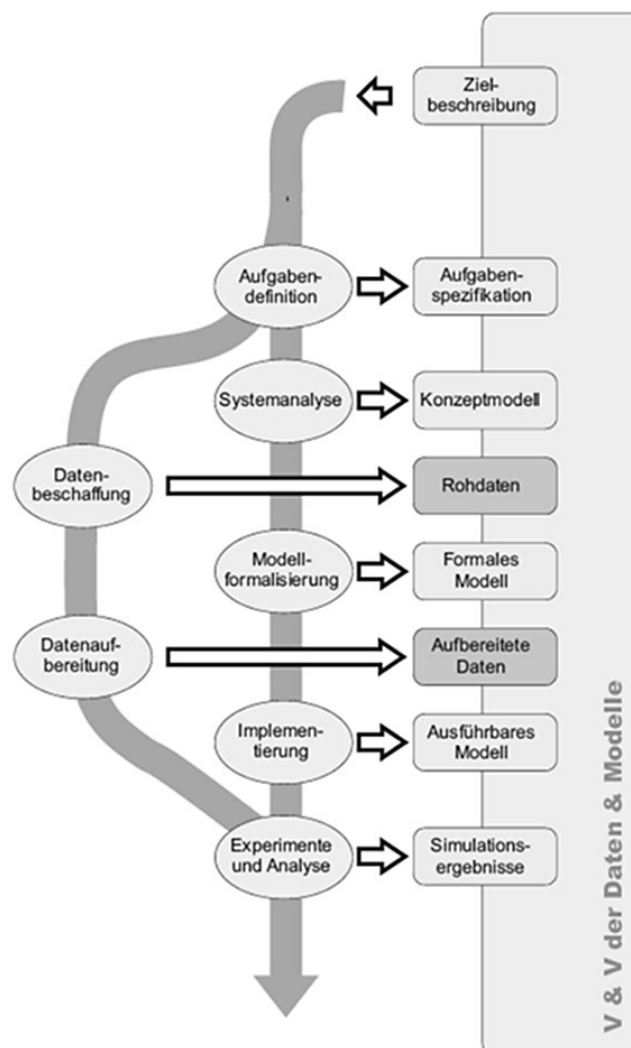


Abbildung 3-9: Übersicht des Modellbildungsprozesses  
(Quelle: Rabe *et al.* 2008, S. 5).

---

Einige in der Realität auftretende Probleme bzw. vorkommende Systeme sind durch eine Vielzahl unterschiedlicher **interagierender Zufallsvariablen** oder **komplex-nichtlinearer Zusammenhänge** gekennzeichnet. Diese Probleme bzw. Systeme können mittels Simulation überhaupt erst einem **Lösungs- bzw. Beschreibungsversuch** zugeführt werden. Im Gegensatz zu einem analytischen Modellansatz kann das **Finden einer optimalen Lösung** im Rahmen eines Simulationsexperiments jedoch **nicht garantiert** werden. Simulationen werden auch dann eingesetzt, wenn eine Problemstellung in der Realität durch ein mathematisches Modell zwar beschrieben werden kann, aber geeignete Lösungsverfahren entweder nicht existieren, in das System nicht ohne Risiko eingegriffen werden kann oder der Ressourcenaufwand viel zu groß ist (Werners 2013, S. 257; Domschke *et al.* 2015, S. 233).

In Bezug auf die in Abschnitt 3.2.2 beschriebene Wirkungsabschätzung im Rahmen des Verkehrsplanungsprozesses können in einem **Simulationsmodell** zum Beispiel verschiedene **Handlungskonzepte** über unterschiedliche **Parameter- bzw. Variablenkombinationen** abgebildet werden. Durch eine schrittweise, systematische Veränderung der Simulationsparameter, z.B. im Rahmen der Szenariotechnik, entsteht so auch die Möglichkeit einer **Kopplung mit einem Optimierungsmodell** (Schwarz-Geschka *et al.* 2016, S. 363ff.).

Grundsätzlich sind **vier verschiedene Formen der Kopplung von Simulations- und Optimierungsmodellen** denkbar, wodurch implizit auch eine Architektur verschiedener Modellteile entsteht (März und Krug 2011):

- Sequentielle Kopplung:
  - Ein Simulationsmodell dient als Eröffnungsverfahren in Bezug auf ein Optimierungsmodell
  - Ein Optimierungsmodell liefert Eingangsparameter für ein Simulationsmodell
- Hierarchische Kopplung:
  - Ein Optimierungs- ist in ein Simulationsmodell integriert
  - Ein Simulations- ist in ein Optimierungsmodell integriert

Im Unterschied zur hierarchischen Kopplung liegen bei der **sequentiellen Kopplung** die Ergebnisse aus der Anwendung der einen Methode als abgeschlossene Werte und somit als **Eingangsdaten für** die Anwendung der **anderen Methode** vor. Hierbei kann einerseits ein Simulationsmodell eine Ausgangslösung für ein Optimierungsmodell bzw. eine Optimierungsstudie erzeugen, weswegen es als Eröffnungsverfahren fungiert. Andererseits kann das Simulationsmodell auch Parameterausprägungen oder Nebenbedingungen erzeugen. Wird hingegen zuerst ein Optimierungsmodell angewendet, dient das Simulationsmodell der anschließenden Validierung bzw. Verifizierung der Ergebnisse oder einer Sensitivitäts- bzw. Robustheitsanalyse der Optimierungsergebnisse (Rabe *et al.* 2008).

Steuert eine der beiden Modellierungsmethoden die andere im Rahmen einer gemeinsamen Modellarchitektur, liegt eine **hierarchische Kopplung** vor, was auch als **simulationsbasierte Optimierung (SBO)** bezeichnet wird (März und Krug 2011, S. 42; Gosavi, 2015). Kennzeichnend für eine simulationsbasierte Optimierung ist die Integration einer zu maximierenden bzw. minimierenden **Zielfunktion** in ein Simulationsmodell, die nach jedem Simulationslauf alle wesentlichen Informationen und Zusammenhänge aufnimmt und so verschiedene **Systemzustände bewertet** (Suhl und Mellouli 2013 S. 270; März und Krug 2011, S. 41ff.).

---

Korrespondierend zu den traditionellen Optimierungsmodellen entspricht bei der **SBO** das **Simulationsergebnis** der **Zielfunktion** eines Optimierungsproblems, welches z.B. ein Kostenwert sein kann, während die **Variablen** eines **Simulationsmodells** den **Entscheidungsvariablen** eines **Optimierungsmodells** gleichen (Krug 2002). Ein wesentlicher Unterschied zu den traditionellen Optimierungsmodellen besteht jedoch darin, dass die **Zielfunktion bei der SBO stochastischer Natur** ist, sie unterliegt zufälligen Schwankungen, je nachdem welche Parameter- bzw. Variablenkombination in einem Simulationslauf betrachtet wird (Affenzeller *et al.* 2015). Einen beispielhaften, generischen Aufbau eines simulationsbasierten Optimierungsmodells im Rahmen der hierarchischen Kopplung zeigt Abbildung 3-10.

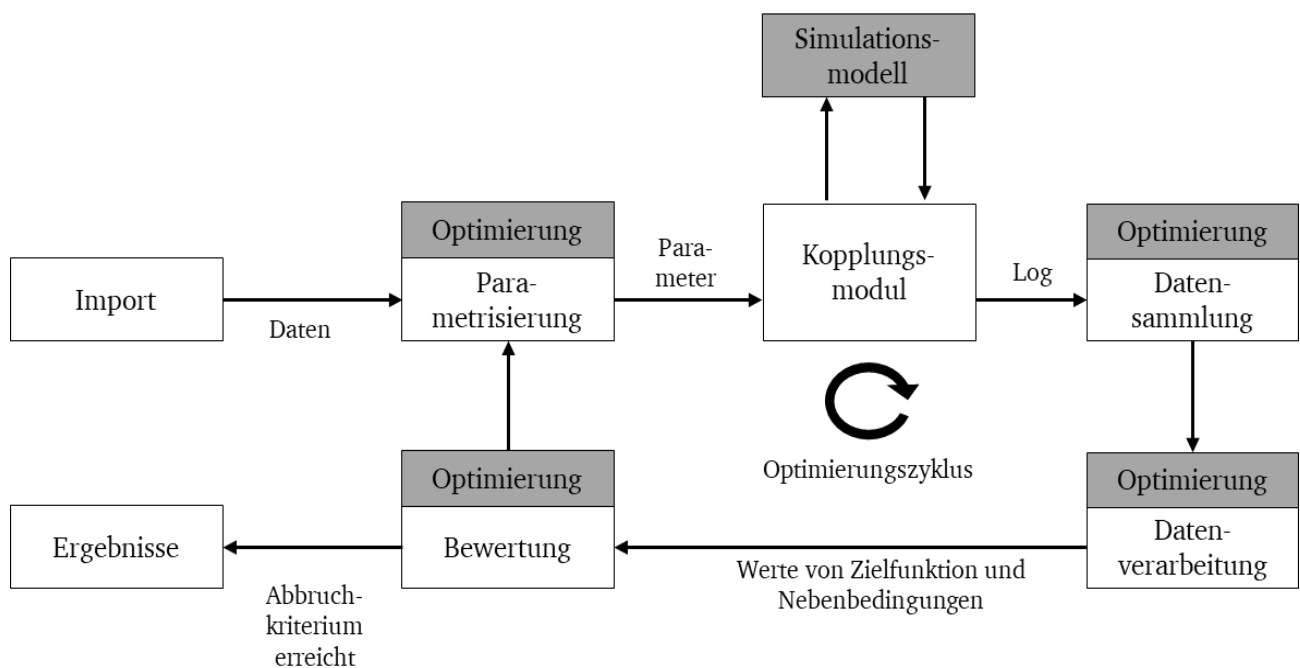


Abbildung 3-10: Generischer Aufbau einer simulationsbasierten Optimierung  
(Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Angelidis *et al.* 2013).

Einige wichtige **Anwendungsfelder** für die SBO aus der Praxis, die stark durch einen stochastischen Charakter geprägt sind, sind z.B. die Planung logistischer Netzwerke, die Allokation von Ärzten und Pflegekräften eines Krankenhauses oder das Lösen von multikriteriellen Zielstellungen in Produktion und Logistik (Fu 2002; Arns *et al.* 2009).

Ist im Rahmen der SBO das **Simulationsmodell** der **dominante Modellteil** innerhalb der Modellarchitektur, wird ein Optimierungsmodell in Abhängigkeit des aktuellen Systemzustands des Simulationsmodells mit Werten versorgt, ermittelt auf Basis dieser Werte eine optimale Lösung für einen Teilausschnitt der Simulation und gibt diese an die Simulation zurück, woraufhin der entsprechende Modellteil der Simulation parametrisiert wird (März und Krug 2011, S. 42).

Wird umgekehrt ein **Simulationsmodell innerhalb** einer **Optimierungs-Modellarchitektur** verwendet, erzeugt das Simulationsmodell einen oder mehrere Systemzustände als Grundlage für eine sich anschließende Bewertung (März und Krug 2011, S. 43). Der Simulation wohnt damit eine Prognosefunktion im Rahmen des Modellablaufs inne, das Optimierungsmodell sucht automatisiert nach

---

der aus Sicht des Modellsubjekts bestmöglichen Handlungsalternative in Abhängigkeit der prognostizierten Systemzustände.

Das **Vorgehen bei einer Simulation** ähnelt damit dem Vorgehen einer **Heuristik** weswegen bei der Kopplung eines Simulationsmodells mit einem Optimierungsmodell insbesondere lokale Suchverfahren und Metaheuristiken als Lösungsverfahren eingesetzt werden (Suhl und Mellouli 2013, S. 269). Diese Kopplungsart ist mit Abstand am häufigsten anzutreffen und wird auch im Rahmen des in Kapitel 5 vorgestellten und in Kapitel 6 angewendeten simulationsbasierten Optimierungsverfahrens umgesetzt (März und Krug 2011, S. 43).

---

---

### 3.2. Planung von Verkehrssystemen

Seit Gründung der Bundesrepublik lässt sich die **Entwicklung der Verkehrsplanung** mit Blick auf veränderte verkehrs-, gesellschafts- und wirtschaftspolitische Schwerpunktsetzungen in **verschiedene Phasen** einteilen (Haefeli 2016; Schönharting und Schuhmann 2010a bzw. 2010b).<sup>17</sup>

Die **erste Phase** wurde von der Priorisierung der Anforderungen des motorisierten Individualverkehrs (MIV) über alle anderen Verkehrsträger und -zweige geprägt. Hierdurch wurde dann auch eine Zunahme der negativen Auswirkungen des Verkehrs auf Menschen und Umwelt ausgelöst. Diese negativen Auswirkungen rückten nunmehr auch in den verkehrspolitischen und den verkehrsplanerischen Fokus. Als Reaktion wurden in dieser „...*Phase des Nachdenkens*...“ in den 1960er Jahren z.B. die Investitionen in den öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) mit Inkrafttreten des Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz (GVFG) erhöht (Schönharting und Schuhmann 2010a, S. 298 ff.).

Während der sich anschließenden **zweiten Phase**, der *Phase des Wertewandels*, zu Beginn der frühen 1980er Jahre setzte ein planerisches Umdenken ein: durch eine nutzerorientierte Angebotsgestaltung könnte der Verkehr prinzipiell vermieden und verlagert werden, um dadurch einen sicheren, effizienteren sowie umweltgerechteren Verkehrsablauf und damit bessere Rahmenbedingungen für Mensch und Umwelt zu schaffen (Schönharting und Schuhmann 2010b, S. 358 ff.). An die Stelle der bis dahin praktizierten *Anpassungsplanung*, einem reagierenden bzw. verkehrsnachfrageorientierten Planungsparadigma, trat eine proaktiv agierende, zielorientierte Verkehrsplanung (verkehrsangebotsorientierte Verkehrsplanung).

Nach heutigem Verständnis, der **dritten Phase**, ist daher die primäre Aufgabe der Verkehrsplanung im Kontext fachplanerischer und politischer Aushandlungs- und Abstimmungsprozesse die „...*zielorientierte, systematische, vorausschauende und informierte Vorbereitung von Entscheidungen über Handlungen, die den Verkehr (Angebot, Nachfrage, Abwicklung und Auswirkungen) nach den jeweils festgelegten Zielen beeinflussen sollen*“ (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2001, S. 6). Die Verkehrsplanung erhebt somit den Anspruch, die Verkehrsentstehung und den Verkehrsablauf sowie deren Auswirkungen entsprechend politisch festgelegter Ziele zu beeinflussen.

Die Verkehrsplanung als wissenschaftliche wie auch praktische Disziplin hat daher eine primär dienende Funktion, wie auch der Verkehr meist keinen Selbstzweck hat. Hierfür muss die **Zusammenarbeit** mit bzw. die Integration der Ergebnisse der anderen **Fachplanungen** bzw. wissenschaftlichen Disziplinen gewährleistet werden, weswegen auch von einem Paradigma der *Integrierten Verkehrsplanung* gesprochen werden kann (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2001, S. 7).

---

<sup>17</sup> Für eine ausführliche Darstellung der Entwicklung der Verkehrsplanung bzw. der dahinterstehenden Planungsparadigmen, deren gesamthafte Wiedergabe für den Verlauf dieser Arbeit als nicht zielführend erachtet wird, empfehlen sich Schönharting und Schuhmann 2010a bzw. 2010b. Für eine Darstellung der historischen Entwicklung des Güterverkehrs bzw. der Logistik siehe Vahrenkamp 2011.

---

Die **integrierte** und **zielorientierte** Verkehrsplanung weist die folgenden Eigenschaften auf, die gleichzeitig auch als **Qualitätsmerkmale** gelten können (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2013, S. 9):

- einen kontinuierlichen Prozessverlauf
- eine intensive Kooperation und Beteiligung aller Akteure
- die Definition eines transparenten und eindeutigen Zielsystems
- eine zielorientierte Nachfragebeeinflussung
- den Einsatz der Szenariotechnik
- die Integration von harten und weichen Maßnahmen in Handlungskonzepte
- ein begleitendes Qualitätsmanagement  
(inklusive Evaluation und kontinuierlicher Wirkungskontrolle)

Nach wie vor sind die **Planung, der Entwurf und der Bau von Verkehrssystemen** sowie deren Betrieb bedeutende Schwerpunkte der verkehrsplanerischen Arbeit in der Praxis. Sie befasst sich also einerseits als originäre Aufgabe mit der Bereitstellung und der **Beeinflussung von Verkehrsangeboten**. Andererseits kommt auch der **Beeinflussung der Verkehrsnachfrage** eine immer größere Bedeutung bei der verkehrsplanerischen Arbeit zu (Kirchhoff 2002, S. 71ff). Neben der Beeinflussung der Verkehrsursachen und der Verkehrsmittelwahl beinhaltet dies auch die Beeinflussung der negativen wie auch positiven Auswirkungen von Ortsveränderungen auf das Verkehrssystem selbst sowie auf Menschen und Umwelt (Rühl 2018, S. 6).<sup>18</sup>

Den theoretischen Rahmen zur zielgerichtet Beeinflussung des existierenden Verkehrsangebots wie auch der Verkehrsnachfrage bildet das **Verkehrsmanagement**, das „...die Beeinflussung des Verkehrsgeschehens durch ein Bündel von Maßnahmen mit dem Ziel, die Verkehrsnachfrage und das Angebot an Verkehrssystemen optimal aufeinander abzustimmen“ zur Aufgabe hat (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2012a, S. 122). Während also die klassischen Aufgaben der Verkehrsplanung den Bau bzw. die Erweiterung von Verkehrsanlagen bzw. deren Betrieb umfassen, nimmt das Verkehrsmanagement das bestehende Verkehrsangebot als gegeben an.

---

<sup>18</sup> Während im Kontext des Verkehrs häufig von negativen Verkehrsfolgen und damit den externen Kosten des Verkehrs die Rede, werden die externen Nutzen des Verkehrs bisher kaum in den Fokus einer solchen Debatte gerückt (Schmid 2005).

---



Das Verkehrsmanagement zielt daher darauf ab, das **bestehende Verkehrsangebot** und die **Verkehrsnachfrage** in **Einklang zu bringen**. Hierzu steht ihnen ein breites Spektrum unterschiedlicher Maßnahmen zur Verfügung, welche sich grundsätzlich in die Wirkungsbereiche *Verkehrssteuerung*, *Verkehrsverlagerung* (räumlich, zeitlich und modal) sowie *Verkehrsvermeidung* einordnen lassen (Fornauf 2015, S. 11). Den Zusammenhang zwischen Verkehrsplanung, Verkehrsmanagement sowie den verschiedenen Aufgabenbereichen zeigt auch Abbildung 3-11.

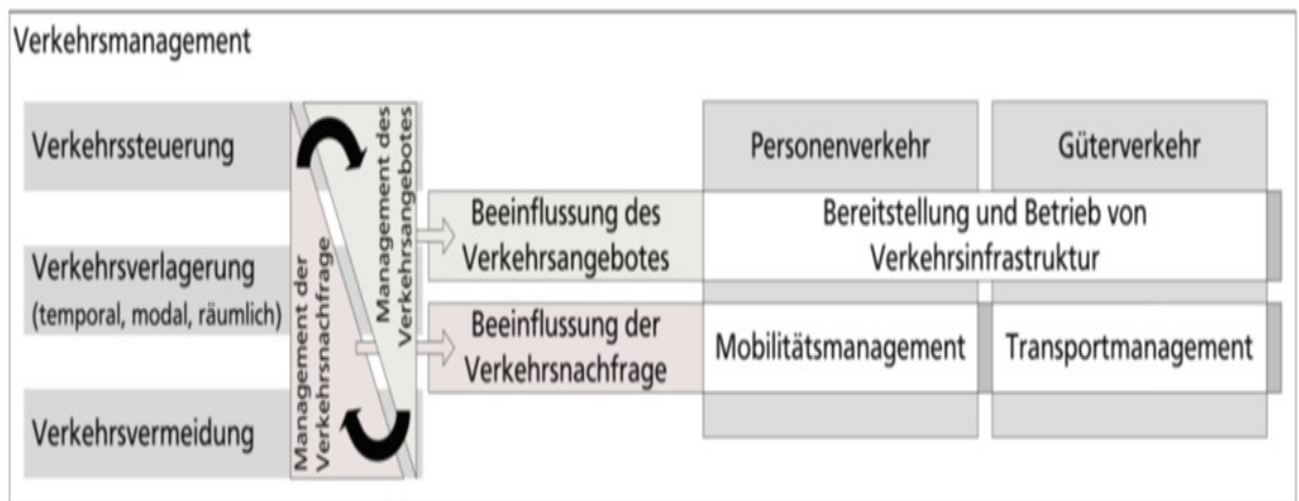


Abbildung 3-11: Verkehrsmanagement und dessen verschiedenen Aufgabenbereichen  
(Quelle: basierend auf Boltze 1998 und Boltze 2019a, S. 279).

### 3.2.1. Planungsprozess für Verkehrssysteme

Auf wissenschaftlicher Ebene haben in Deutschland die Mitglieder der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (FGSV) neben weiteren verkehrsplanerischen und verkehrstechnischen Themengebieten auch maßgeblich an der Entwicklung des theoretischen Rahmens für die Ausgestaltung der **Planungsprozesse für Verkehrssysteme** mitgewirkt. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse werden in Abhängigkeit ihres Verbindlichkeitsgrads in Richtlinien und Hinweispapieren festgehalten. In Bezug auf das Vorgehen bei einer Verkehrsplanungs-Aufgabe wurde erstmalig im Jahr 1985 ein „Leitfaden für Verkehrsplanungen“ publiziert. Der Leitfaden wurde dann im Jahr 2001 überarbeitet, um neusten Erkenntnissen und den oben beschriebenen, planerischen Paradigmenwechseln gerecht werden zu können (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2001). Im Jahre 2018 wurden dann die „Empfehlungen für Verkehrsplanungsprozesse“ als aktuellste Ausgabe veröffentlicht, die die Methodik weiter verfeinert haben (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2018).

Der Leitfaden bzw. die Empfehlungen enthalten eine **Methode** zur Gewährleistung einer **integrierten und zielorientierten Verkehrsplanung**, die im Allgemeinen unter der Bezeichnung *Verkehrsplanungsprozess* bekannt ist (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2001, S. 8 ff). Der **Verkehrsplanungsprozess** dient der Vorbereitung von politischen Entscheidungen über verkehrsplanerische Handlungskonzepte sowie deren Priorisierung und Finanzausstattung auf allen politisch-räumlichen Ebenen (d.h. den Ebenen der Europäischen Union, des Bundes, der Bundesländer,

---

der Regionen, der Städte und Gemeinden) (Sack 2016). Mit Hilfe des Verkehrsplanungsprozesses können die folgenden, primär planerischen Aufgabenfelder adressiert werden (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2001, S. 8):

- Beschreibung, Analyse und Beurteilung von Zuständen
- Entwurf und Prüfung von Zielvorstellungen bzw. -konzepten
- Entwurf, Konzeption, Beurteilung und Abwägung von Handlungsmöglichkeiten, -strategien und Maßnahmenkonzepten
- Entscheidungsvorbereitung über Handlungskonzepte
- Umsetzungsbegleitung
- Erfolgs- bzw. Wirkungskontrolle

Der Verkehrsplanungsprozess als Methode besteht aus insgesamt **fünf Phasen**: der Vororientierung, der Problemanalyse, der Maßnahmenuntersuchung, der Abwägung und Entscheidung sowie der Umsetzung und Wirkungskontrolle. Die untereinander **rückkoppelnden Phasen** sowie der Ablauf des **Verkehrsplanungsprozesses** können der nachfolgenden Abbildung 3-11 auf der folgenden Seite entnommen werden.

Die **Phase der Vororientierung** dient der Vorbereitung des Planungsprozesses sowie dessen Strukturierung (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2013, S. 15ff). Zu den Aufgaben in dieser Phase des Verkehrsplanungsprozesses gehört, neben der meist ohnehin im Rahmen der Erfüllung öffentlich-hoheitlicher, verkehrsbezogener Aufgaben stattfindenden, kontinuierlichen Sammlung von Verkehrsdaten, Beschwerden oder Mängelhinweisen auch das Feststellen eines Planungsbedarfs sowie das Definieren einer Planungsaufgabe. Im Rahmen der Definition der Planungsaufgabe ergibt sich dann auch meist, ob die zu leistende Planungsaufgabe den Einsatz von Verkehrsnachfrage- oder Verkehrsflussmodellen oder anderer Modellierungsmethoden erfordert oder und wie hierbei ggf. die Qualität des Modells zu sichern ist (ebenda, S. 70).

In der **Phase der Problemanalyse** werden wichtige Grundlagen für nachfolgende Prozessschritte gelegt und die Rahmenbedingungen geschaffen (ebenda, S. 14). Die Arbeitsschritte in dieser Phase bestehen aus einer Zustandsanalyse, der Erarbeitung von Leitlinien und Zielvorstellungen sowie der Ermittlung Mängeln und Chancen, die im Wege der Planungsaufgabe ergriffen bzw. beseitigt werden können. Die entwickelten Leitlinien und Zielvorstellungen dienen einerseits als normativer Bezugsrahmen für die weiteren Prozessschritte, andererseits dient die Festlegung von Zielkriterien und Anspruchsniveaus der Vorbereitung der Phase der *Maßnahmenuntersuchung* und hier insbesondere des Arbeitsschritts der *Bewertung* der definierten Maßnahmen hinsichtlich ihres Zielbeitrags. Die Leitlinien und Zielvorstellungen bilden damit die Grundlage für die im zielorientierten Planungsprozess folgende Entwicklung von Handlungskonzepten, der Ableitung von Maßnahmen sowie deren Bewertung. Allerdings kann hierbei subjektiv Einfluss auf den weiteren Verlauf des Planungsprozesses genommen werden, indem z.B. bestimmte Zielbereiche nicht einbezogen werden (Künne *et al.* 2005, S. 5).

---

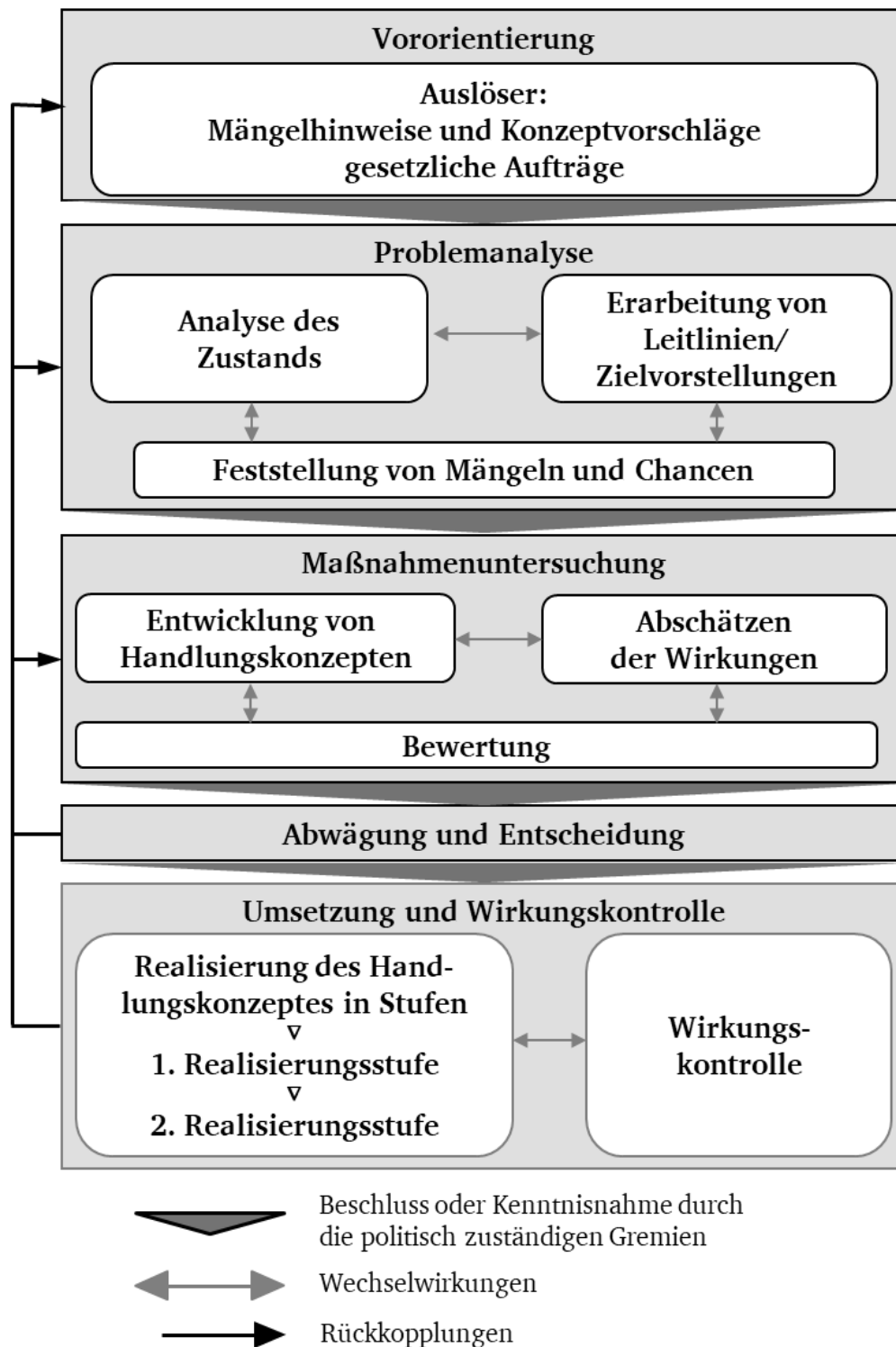


Abbildung 3-12: Verkehrsplanungsprozess  
(Quelle: eigene Darstellung basierend auf Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2001).

Die **Phase der Maßnahmenuntersuchung** bündelt die eigentlichen verkehrsplanerischen Arbeitsschritte, weswegen sie auch als die wesentliche Phase im Verkehrsplanungsprozess gelten kann (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2013, S. 14). In dieser Phase werden als Arbeitsschritte die Entwicklung von Handlungskonzepten, das Abschätzen der Wirkungen dieser

---

Handlungskonzepte sowie die Bewertung der Wirkungen dieser Handlungskonzepte durchgeführt.<sup>19</sup> Die Arbeitsschritte Wirkungsabschätzung und Bewertung werden wegen ihrer zentralen Bedeutung daher auch eingehender in den nachfolgenden beiden Abschnitten beschrieben.

In der **Phase der Abwägung und Entscheidung** werden auf Basis der in den vorangegangenen Phasen bzw. Arbeitsschritten erlangten Erkenntnisse Strategien bzw. Rahmen- und Maßnahmenpläne, ein konkretes Handlungskonzept sowie eine Umsetzungsstrategie ausgewählt (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2013, S. 19). Die Auswahl bzw. die Entscheidung sind Aufgaben, die den (verkehrs-)politischen Entscheidungsträgern zufallen, die für die jeweilige Planungsaufgabe verantwortlich sind. Daher ist hierbei von einem iterativen Abstimmungsprozess zwischen den Planern und den Entscheidungsträgern und ggf. weiteren Interessengruppen auszugehen, da politische Aushandlungsprozesse in der Regel zu modifizierten Handlungskonzepten führen (Bandelow *et al.* 2016). Die sich dann ggf. anschließende Entwicklung von modifizierten Handlungskonzepten erfolgt ebenfalls als iterativer Prozess (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2013, S. 19).

In der **Phase der Umsetzung und Wirkungskontrolle** werden die beschlossenen Handlungskonzepte bzw. Maßnahmen (meist schrittweise) verwirklicht. Praktisch kann häufig beobachtet werden, dass „... mit der Realisierung unstrittiger und leicht zu finanzierender Sofortmaßnahmen ...“ begonnen wird, was bedeutet, die Umsetzung beginnt meist mit solchen Maßnahmen, deren planungsrechtliche Voraussetzungen möglichst schnell geschaffen bzw. deren Finanzierbarkeit zügig sichergestellt werden kann (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2013, S. 20). Im Anschluss der Umsetzung sind Wirkungskontrollen mittels Evaluationen durchzuführen (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2012d). Insgesamt ist der aus Sicht der volkswirtschaftlichen Mittelverwendung wichtige Aspekt des Qualitätsmanagements jedoch in der Verkehrsplanung eher unterrepräsentiert (Rausch 2016).

Wie jede Planung ist auch die **Verkehrsplanung ein kontinuierlicher Prozess**, d.h. es sollte weder einen definierten Anfang noch ein Ende des Prozesses geben. Bezüglich des Prognose- bzw. Umsetzungshorizonts von verkehrsplanerischen Handlungskonzepten ist ein Prognosezeitraum zwischen 15 und 25 Jahren sinnvoll. Verkehrsplanungen sollen in der Regel in Abständen von etwa 5 Jahren überarbeitet werden, in jedem Falle jedoch dann, wenn sich Rahmenbedingungen, Ziele oder Probleme wesentlich geändert haben (Richter 2016, S. 25).

Die frühzeitige und möglichst umfassende, offene **Information und Beteiligung von Trägern öffentlicher Belange** (TöB), Interessengruppen, Verbänden, Betroffenen und Bürgern erleichtern im Regelfall das Durchlaufen des Verkehrsplanungsprozesses (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2012c). Daher kommt der Information und Beteiligung der jeweils betroffenen Teile der Gesellschaft eine besondere Bedeutung im Allgemeinen und im Besonderen in Bezug auf die neuartigen Systeme zur Energieversorgung des Elektroverkehrs während der Fahrt zu.

---

<sup>19</sup> Je nach verkehrsplanerischer Aufgabenstellung können z.B. Strategien und Maßnahmen im Verkehrsmanagement oder bauliche Varianten zur Erweiterung, Veränderung oder dem Neubau von Verkehrsanlagen erarbeitet werden. *Handlungskonzepte* soll daher hier als vom Planungsgegenstand unabhängiger Oberbegriff verwendet werden, da Planung letztlich nichts anderes ist als gedanklich vorweggenommenes Handeln (Schneeweiß 1991, S. 1-2).

---

---

### 3.2.2. Wirkungsabschätzung im Rahmen des Verkehrsplanungsprozesses

Die Phase der **Maßnahmenuntersuchung** ist während des Verkehrsplanungsprozesses der **Kern der verkehrsplanerischen Arbeit**. Ausgehend von den Ergebnissen der Problemanalyse werden Handlungskonzepte zur Beseitigung der identifizierten Mängel bzw. zur Nutzung der vorhandenen Chancen entwickelt. Bei der Wirkungsabschätzung sollen dann, unter Annahme einer Umsetzung der definierten Handlungskonzepte, die Wirkungen dieser Handlungskonzepte auf die Bereiche „... *Sicherheit, Wirtschaftlichkeit, Umwelt und Umfeld sowie Qualität und Mobilität untersucht sowie möglichst detail- und realitätsnah erfasst werden* ...“ (Fornauf 2015, S. 73). Mithin sollen also die **quantitativen und qualitativen Veränderungen des Verkehrsgeschehens** abgeschätzt werden, die infolge einer unterstellten Umsetzung der entwickelten Handlungskonzepte mit hoher Wahrscheinlichkeit eintreten werden.

Zu diesem Zweck werden zuerst die Wirkungskriterien anhand des im Rahmen der *Problemanalyse* erstellten Zielkonzepts abgegrenzt (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2013). Solche **Wirkungskriterien** könnten z.B. die Summe der vermiedenen Kohlenstoffdioxid-Emissionen in Tonnen oder monetisierte Bau- und Betriebskosten sein. Darauf aufbauend werden Ursache-Wirkungs-Ketten zwischen messbaren Kenngrößen des Verkehrssystems und den Wirkungskriterien ermittelt bzw. dargestellt. So wirkt sich z.B. in der Regel eine Reduktion der staubedingten Wartezeiten auf einem Streckenabschnitt negativ auf die Summe der dort emittierten Menge an Kohlenstoffdioxid aus. Daran anknüpfend werden hinsichtlich aller vorab definierter Wirkungskriterien die mit einer Umsetzung verbundenen, erwarteten Veränderungen der verkehrssysteminhärenten Kenngrößen mit Hilfe geeigneter Methoden abgeschätzt und diese abschließend nachvollziehbar in einem Wirkungsprofil dargestellt.

Beim **Vorgehen im Rahmen der Wirkungsabschätzung bzw. -ermittlung** sind grundsätzlich mehrere verschiedene **Analysefälle** zu unterscheiden, wie aus Abbildung 3-13 auf der folgenden Seite ersichtlich wird. Der sog. **Analyse-Nullfall** spiegelt den Ausgangszustand des Verkehrssystems zu Beginn der Planung für einen bestimmten Bezugszeitpunkt oder -raum wider (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2013, S. 18ff). Neben dem Analyse-Nullfall umfasst eine Wirkungsabschätzung den sog. **Prognose-Nullfall**, der alle, zwischen dem *Analyse-Nullfall* und dem Beginn des festgelegten Prognosezeitraums als sicher anzunehmenden Entwicklungen sowie die Wirkungen von ggf. bereits in der Umsetzung befindlichen Handlungskonzepten berücksichtigt. Mithin beinhaltet er also das erwartete Zukunftsbild ohne die weitere Umsetzung der verkehrsplanerischen Handlungskonzepte, die im jeweiligen Planungsprozess erarbeitet worden sind. Für die Prognose im Zuge des jeweiligen Planungsprozesses dient der Prognose-Nullfall damit als Bezugspunkt, mit dem die Wirkungen einzelner Maßnahme verglichen werden.

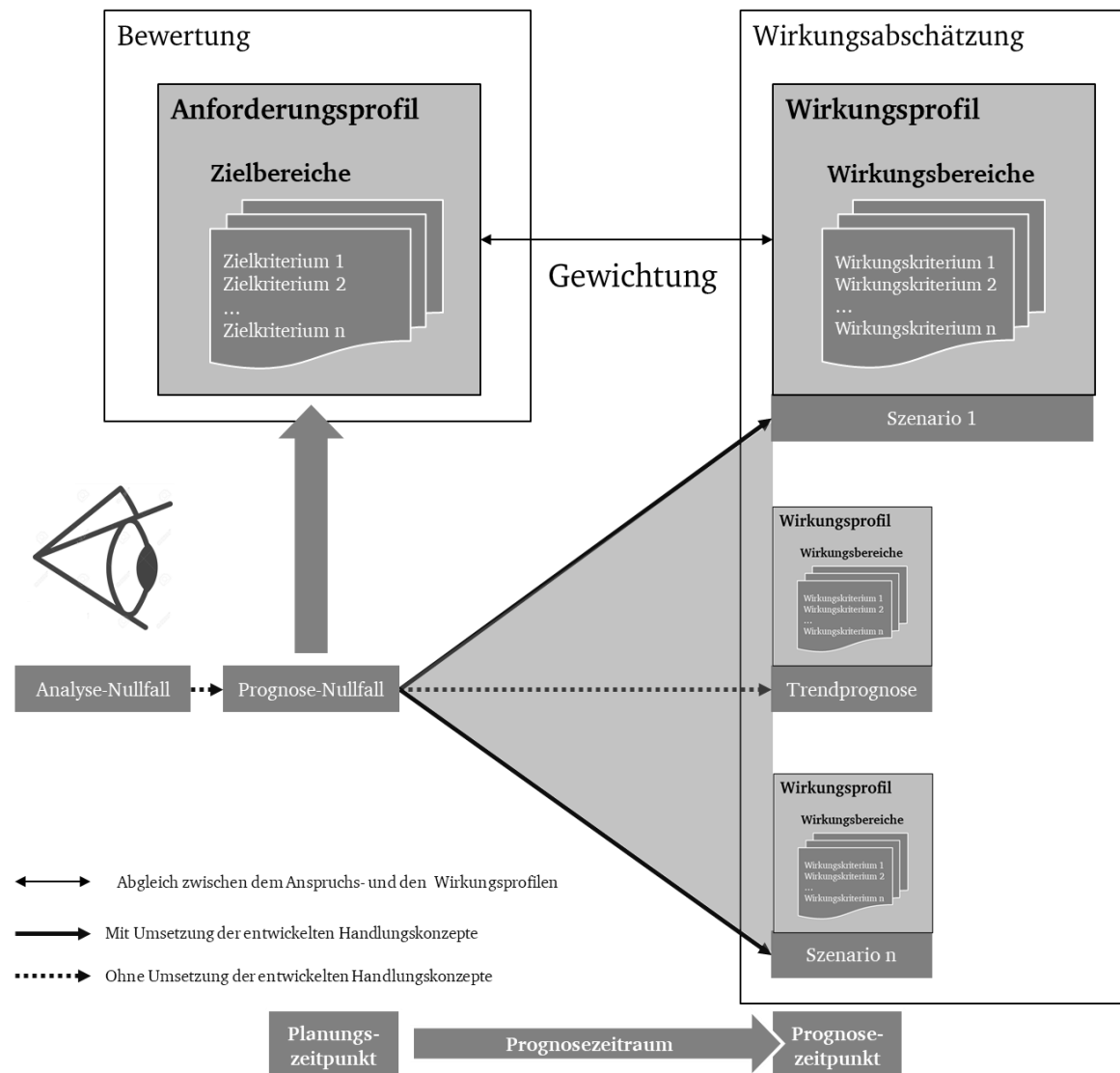


Abbildung 3-13: Zusammenhang zwischen Prognosefällen, Szenarien sowie Wirkungs- und Anforderungsprofil (Quelle: eigene Darstellung basierend auf Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2013).

Bis auf wenige Ausnahmen, die dann bei der Definition des Prognose-Nullfalls berücksichtigt werden, sind zukünftig zu erwartende **Systemzustände mit Unsicherheit** behaftet, was insbesondere für komplex-adaptive Systeme wie Verkehrssysteme gilt. Daher wird zur Abbildung zukünftiger Zustände sowohl des Verkehrssystems als auch der umgebenden Systemumwelt (d.h. hier insbesondere das Wirtschafts- und Gesellschaftssystem sowie die sich daraus ergebenden Aktivitätsmuster) auf die Szenariotechnik zurückgegriffen (siehe z.B. Geschka 2006, S. 360ff oder Schwarz-Geschka *et al.* 2016).

In diesem Zusammenhang ist ein **Szenario** „...ein Bild einer denkbaren zukünftigen Situation ...“ (Geschka und Hammer 1990, S. 313). Dieses Zukunftsbild ergibt sich aus einer vorab festgelegten Kombination von relevanten Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen. Im Kontext der verkehrsplanerischen Wirkungsabschätzung besteht die Aufgabe der Szenarien darin, verschiedene Handlungskonzepte bzw. deren Kombinationen zu verdeutlichen und ihre Wirkungen transparent zu machen. Szenarien werden fallspezifisch auf Grundlage des entwickelten Leitbilds und des Zielsystems sowie durch die festgestellten Mängel und Chancen aus der Phase der *Problemanalyse* abgeleitet.



Ein **Basisszenario**, die sog. *Trendprognose*, unterstellt die voraussichtlich bis zum Prognosezeitpunkt umgesetzten Handlungskonzepte, idealerweise solche, die schon beschlossen und finanziert sind. **Weitere Szenarien**, die die Umsetzung der zu vergleichenden Handlungskonzepte unterstellen, können definiert werden. Daraus ergibt sich für **jedes Szenario** ein **Wirkungsprofil**. Zusätzlich können als weitere Dimension bei der Erstellung von Szenarios bestimmte Entwicklungen z.B. hinsichtlich des zum Prognosezeitpunkt existierenden Verkehrsangebots, des Aktivitätensystems oder der Verkehrsmittel unterstellen, können je nach Planungsaufgabe definiert werden. Jedes so erzeugte Szenario muss dann mit jedem Handlungskonzept hinsichtlich des entstehenden Wirkungsprofils untersucht werden. Auf diesem Weg können auch alternative, nicht zielführende Handlungskonzepte definiert und deren Wirkungen ermittelt werden. Somit können Szenarien auch die Wirkungsweise der unterschiedlichen Handlungskonzepte beschreiben und gleichzeitig die Systemkenntnisse der Planer verbessern.

Noch einmal hervorzuheben ist, dass die **Bewertung** der ermittelten **Wirkungsprofile** und das Vorgehen deren Ermittlung **zwei unterschiedliche Arbeitsschritte** im Rahmen der Maßnahmenuntersuchung bilden. Erst eine **Allokation von Werten** zu den prinzipiell wertfreien **Wirkungsprofilen** anhand des vorab definierten Zielsystems, das in der Regel die Bereiche Sicherheit, Wirtschaftlichkeit, Umwelt und Umfeld sowie Qualität und Mobilität enthält, erlaubt Aussagen darüber, inwieweit die einzelnen Handlungskonzepte in den verschiedenen Szenarien zur Erreichung der im Zielsystem genannten **Anforderungen** geeignet sind.

Den Arbeitsschritt der Bewertung hat Abschnitt 3.2.3. zum Inhalt. Im nachfolgenden Abschnitt soll eine Übersicht über Methoden zur Wirkungsabschätzung verkehrsplanerischer Handlungskonzepte gegeben werden. Zur **Wirkungsabschätzung** im Rahmen der verkehrsplanerischen *Maßnahmenuntersuchung* lassen sich prinzipiell **qualitative** und **quantitative Methoden** unterscheiden (Fornauf 2015, S. 56ff). Eine Übersicht dazu liefert Abbildung 3-14.

Methoden zur Wirkungsermittlung verkehrsplanerischer Handlungskonzepte	
Qualitative Methoden	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Intuitive Methode</li> <li>▪ Öffentliche Diskussion</li> <li>▪ Expertenbefragung</li> </ul>
Quantitative Methoden	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Delphi-Methode</li> <li>▪ Experimente</li> <li>▪ Berechnungen</li> <li>▪ Trendfortschreibung/Extrapolationen</li> <li>▪ Modellbildung               <ul style="list-style-type: none"> <li>– Verkehrsnachfragemodelle</li> <li>– Verkehrsflussmodelle</li> <li>– Weitere Modellklassen</li> </ul> </li> </ul>

Abbildung 3-14: Übersicht von Methoden zur Wirkungsabschätzung verkehrsplanerischer Handlungskonzepte  
(Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Fornauf 2015, S. 56ff).



---

Das **Spektrum** der zur Wirkungsabschätzung geeigneten Methoden ist sehr **breit**, wie Abbildung 3-14 bereits verdeutlicht. Aus diesem Grund sollen in den folgenden beiden Abschnitten nur einige wichtige, in der Praxis häufig zum Einsatz kommende bzw. im Rahmen dieser Arbeit verwendete Methoden beschrieben werden.

### 3.2.2.1. Qualitative Methoden

Wenn der Planungsraum sehr klein ist, die Planungsaufgabe in Bezug auf deren Netzbedeutung überschaubar oder aber die Wirkungen eines Handlungskonzepts (noch) nicht quantifizierbar sind, eignen sich **qualitative Methoden** zur Abschätzung der Wirkungen verkehrsplanerischer Handlungskonzepte (Fornauf 2015, S. 72ff). Hierbei werden die Wirkungen verkehrsplanerischer Handlungskonzepte ausschließlich durch eine argumentative Beschreibung abgeschätzt, die jedoch nachvollziehbar dokumentiert wird. Die qualitativen Methoden umfassen die intuitive Methode, die öffentliche Diskussion sowie die Expertenbefragung.

Die **intuitive Methode** als ein Beispiel dieser Methodenkatgorie beruht auf dem Erfahrungswissen der beteiligten Akteure am Verkehrsplanungsprozess. Potentielle Wirkungen verkehrsplanerischer Maßnahmen werden allein auf Basis von Experteneinschätzungen ermittelt (Scholles 2005, S. 97). Die so abgeschätzten Wirkungen werden je Handlungskonzept dokumentiert und einer Bewertung zugeführt.

Bei der **öffentlichen Diskussion** werden die positiven und negativen Wirkungen eines Handlungskonzepts durch ein Gremium ermittelt, indem, wie bei der intuitiven Methode auch, auf das Erfahrungswissen der Teilnehmer einer (Panel-)Diskussionsrunde zurückgegriffen wird (Bohnsack und Przyborski 2009). Hierbei ist die Auswahl der Diskussionsteilnehmer entscheidend für die Qualität der Ergebnisse, es sollten möglichst alle betroffenen Interessengruppen oder TöB eingeladen und ihnen ein Rederecht eingeräumt werden (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2010).

Eng mit der öffentlichen Diskussion verwandt ist die **Expertenbefragung**, wobei auf das Wissen mehrerer Experten zurückgegriffen wird, die in getrennten Interview-Runden anhand eines vorab definierten Interview-Leitfadens befragt werden. Verbunden mit Expertenbefragungen als Form der Wirkungsabschätzung ist die Hoffnung, dass Experten in der Lage sind, Wirkungen in bestimmten Bereichen besser abschätzen zu können als dies bei Interessengruppen, TöB-Vertretern und einzelnen fachfremden Individuen der Fall ist (Fornauf 2015, S. 60). Es lassen sich verschiedene Arten der Interviewführung z.B. das Fokusgruppeninterview oder das problemzentrierte Interview unterscheiden, die unterschiedliche Fähigkeiten von den Interviewenden abverlangen (Aghamanoukjan *et al.* 2009; Kurz *et al.* 2009).

**Nachteilig** bei den **verbal-argumentativen Methoden** ist, dass zwischen der Bewertung und der Wirkungsabschätzung als getrennte Arbeitsschritte oft nicht klar differenziert werden kann, es kann zu „...komplizierten Wechselwirkungen zwischen indikativen und normativen, z.T. auch emotionalen Elementen...“ kommen (Scholles 2005, S. 97). Zum Teil können sowohl Ergebnisse der Wirkungsabschätzung als auch die Ergebnisse der Bewertung nur schwer nachvollziehbar sein, die Akzeptanz der Handlungskonzepte kann auf dieser Basis nicht gewährleistet werden. Dennoch kann es

---

---

bei „... großer Erfahrung eines Planers oder Teams durchaus zu akzeptablen Ergebnissen bei geringem Aufwand führen...“ (Scholles 2005, S. 97).

### 3.2.2.2. Quantitative Methoden

Eine eher qualitative Abschätzung der Wirkungen verkehrsplanerischer Handlungskonzepte kann durch die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Methoden erfolgen. Oftmals eignen sich jedoch **quantitative Methoden** besser, zukünftige Zustände der Verkehrssysteme vorherzusagen, insbesondere bei hoher Netzbedeutung des Planungsgegenstandes. Zu den quantitativen Methoden der Wirkungsabschätzung gehören die **Delphi-Methode**, das **Experiment**, Verkehrserhebungen und darauf aufbauende **Berechnungen**, die **Trendfortschreibung** aus vorhandenen Verkehrsdaten sowie die **Modellbildung**.

Eine Sonderform der in Abschnitt 3.2.2.1 vorgestellten Expertenbefragung ist die **Delphi-Methode**, die weitestgehend auf dem Vorgehen der Expertenbefragung beruht, allerdings stärker formalisiert ist (Scholles *et al.* 2008, S. 317ff). Die Befragung der Experten wird individuell, schriftlich und anonymisiert durchgeführt, damit gewährleistet werden kann, dass einerseits die Befragten nicht durch andere Teilnehmer oder die Befragenden beeinflusst werden. Andererseits stellt dies auch sicher, dass die Befragenden nicht persönlich beeinflusst sind. Die Befragung kann mittels geeigneter statistischer Verfahren (z.B. Bildung von arithmetischen Mitteln oder Perzentilen) ausgewertet und somit z.B. mittlere Wirkungsprofile abgeschätzt werden (Döring und Bortz 2016, S. 400). Die Ergebnisse der ersten Runde werden den Experten zur erneuten Einschätzung zurückgespielt, die Urteilsfindung entsteht somit durch einen iterativen Prozess über mehrere Befragungsrunden.

Ein **Experiment** ist eine „... wiederholbare Beobachtung unter kontrollierten Bedingungen, wobei eine (oder mehrere) unabhängige Variable(n) bewusst so verändert wird (werden), dass eine Überprüfungsmöglichkeit der zu Grunde liegenden Hypothese (Behauptung eines Ursache-Wirkungs-Zusammenhangs) möglich ist“ (Collin 2005, S. 118). Hierbei lassen sich **Labor-** und **Feldexperimente** unterscheiden: bei Laborexperimenten können eventuell bestehende Einflüsse von externen Störvariablen weitgehend ausgeschaltet werden während ein Feldexperiment in einer natürlichen Umgebung durchgeführt wird. Mit Bezug auf die Verkehrsplanung sind **Laborexperimente** am ehesten mit der **Modellbildung** zu vergleichen während sich in Feldexperimenten durch versuchsweise in das reale Verkehrsnetz implementierte Handlungskonzepte in beschränktem Umfang deren Wirkungen ermitteln lassen. Die hier ermittelten Wirkungen sind in der Regel zuverlässig und genau.

Ferner können mit Hilfe von Experimenten insbesondere Verhaltensweisen der Verkehrsteilnehmer auf bestimmte verkehrsplanerische Handlungskonzepte beobachtet werden (Fornauf 2015, S. 78). Allerdings ist diese Form der Wirkungsabschätzung, je nach implementiertem Handlungskonzept und den dafür notwendigen verkehrstechnischen Komponenten, mit hohem Aufwand verbunden. Daneben sind auch rechtliche Fragestellungen im Kontext neuer technischer Systeme im Zuge von Feldexperimenten im Vorfeld zu klären (Langhagen-Rohrbach und Doepgen 2020). Der **eHighway-Feldversuch in Hessen** kann zum Beispiel als ein **verkehrsplanerisches Feldexperiment** aufgefasst werden (Boltze *et al.* 2020).

---

In zahlreichen verkehrsplanerischen und verkehrstechnischen Handbüchern bzw. Richtlinien sowie verkehrswissenschaftlichen Veröffentlichungen finden sich formale **Berechnungsmethoden** für bestimmte verkehrliche Kenngrößen (siehe z.B. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2015). Zum Einsatz dieser Methoden ist eine breite Datenbasis erforderlich, anhand derer sich zuverlässige und möglichst genaue Ergebnisse ermitteln lassen, weswegen häufig auf Verkehrserhebungen bzw. Verkehrsdaten zurückgegriffen wird (Geistefeldt *et al.* 2017; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2009). Falls passende Verkehrsdaten nicht kontinuierlich erhoben werden, sind diese unter Beachtung des geltenden Richtlinienwerks zu erheben (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2012b; Collin, 2005). Beim Einsatz dieser Methoden können einzelne Wirkungsbereiche untersucht werden, die Wirkungen, die sich durch Interaktion verschiedener Maßnahmen innerhalb eines Handlungskonzepts ergeben, können im Gegensatz zur Modellierung aber nicht bzw. nur bedingt abgebildet werden.

Neben dem Einsatz der Berechnungsmethoden können auch statistische Methoden zur **Trendfortschreibung bzw. –extrapolation** verwendet werden, die schon seit Langem Verwendung in Verkehrsplanung und Verkehrstechnik finden (Wartmann 1961; Andorfer 1970; Vogt 2005). Bei diesen Methoden werden auf Basis vorhandener Verkehrsdaten im Rahmen einer Zeitreihenanalyse mehrerer Bezugszeiträume (z.B. Jahre oder Monate) zukünftige Systemzustände vorhergesagt. Dazu werden die Verkehrsdaten meist um saisonale Einflüsse bereinigt um dann erkannte Trends fortzuschreiben. Diese Art der Prognose eignet sich für kurze Prognosezeiträumen, in den sich die Determinanten der wesentlichen verkehrlichen Kenngrößen nicht drastisch ändern (Ortuzar und Willumsen 2011; Cascetta 2009).

Quantitative Methoden, die auf statistische und mathematische **Modelle** zurückgreifen, bieten prinzipiell die Möglichkeit, den Prozess der Wirkungsermittlung transparent und nachvollziehbar darzustellen. Zudem sind Modelle in der Lage, ex ante möglicherweise nicht erkannte Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge aufzudecken. In der Regel werden Ergebnisse auf dieser Basis durch den Kreis der zuständigen Entscheider auch eher akzeptiert. Die **Modellbildung als quantitative Methodenklasse** bzw. die **Verkehrsnachfrage- und Verkehrsflussmodelle** werden wegen dem unmittelbar offensichtlichen Bezug zur Fragestellung noch einmal gesondert in **Abschnitt 3.2.4** vorgestellt.

### 3.2.3. Bewertung im Rahmen des Verkehrsplanungsprozesses

Das Ziel einer verkehrsplanerischen **Bewertung** ist die „...*Optimierung des Ressourceneinsatzes unter gesellschafts-, wirtschaf- und umweltpolitischen, u.a. Gesichtspunkten*“ (Borken-Kleefeld 2007, Fl. 9). Bei jeder Bewertung, unabhängig von der konkreten Entscheidungssituation, stellt ein wertendes Subjekt eine gedankliche Beziehung zu einem gewerteten Objekt mittels eines Wertträgers her (Ritter 2005, S. 97). Zum Beispiel lässt sich der **Wert** eines Gebrauchsguts (Objekt) aus Sicht eines potentiellen Käufers (Subjekt) durch den Wertträger Geld und dessen persönlichen Bewertungsmaßstab zum Ausdruck bringen. Eine solche Bewertung geschieht meist intuitiv und subjektiv, sie ändert sich also mit dem Wertmaßstab des jeweils wertenden Subjekts. Im **Verkehrsplanungsprozess** ist es aus diesem Grund notwendig, zunächst ein möglichst **widerspruchsfreies und umfassendes Zielsystem**, auch in Abstimmung mit den jeweils zuständigen politischen Entscheidungsträgern, im Rahmen der Phase der

---

---

Problemanalyse zu definieren, in dem alle bewertungsrelevanten Aspekte berücksichtigt werden (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2013, S. 14).

Der Arbeitsschritt der **Bewertung** findet **im Zuge des Verkehrsplanungsprozesses** während der Phase der Maßnahmenuntersuchung statt. Hierbei werden die im Rahmen des Arbeitsschritts *Wirkungsabschätzung* ermittelten Zielbeiträge verkehrsplanerischer Handlungskonzepte in Form der Wirkungsprofile mit dem in der Phase der *Problemanalyse* definierten Wert- bzw. Zielsystem als normativen Bezugsrahmen in Verbindung gebracht. Das **Bewerten und das Entscheiden** sind im Kontext des Verkehrsplanungsprozesses **zwei unterschiedliche Tätigkeiten**: eine Bewertung als Teil der eigentlichen verkehrsplanerischen Arbeit wird im Rahmen der entscheidungsvorbereitenden Funktion vorgenommen während die notwendige Abwägung und Entscheidung über Handlungskonzepte den politischen Entscheidungsträgern der verschiedenen staatlichen Hierarchieebenen obliegt (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2013, S. 12ff). Solche Abwägungsprozesse, die häufig auch Interessengruppen oder TöB einbeziehen, haben zur Folge, dass nicht zwangsläufig die im Zuge der Bewertung als bestes Handlungskonzept ermittelte Alternative gewählt wird, sondern ein eher konsensfähiges Handlungskonzept (Scholles 2005, S. 105; Scheiner, 2003, S. 8)

Aus diesem Grund lassen sich während des Durchlaufens des Planungsprozesses eine **Informationsebene** und eine **Prozessebene** unterscheiden (Scholles 2005, S. 97f.). Auf der Informationsebene werden verkehrsplanerische Handlungskonzepte vorbereitend entworfen, deren Wirkungsprofile ermittelt und dann bewertet, während „...auf der Prozessebene Sachverhalte festgelegt, zu involvierende Akteure oder sonstige Betroffene durch Partizipations- und Kooperationsmethoden beteiligt, Maßnahmen ausgewählt und schließlich eine Entscheidung getroffen wird“ (Fornauf 2015, S.12). Der Einsatz von Bewertungsmethoden im Verkehrsplanungsprozess hat daher einerseits die Aufgabe, die Kommunikation, Kooperation und Partizipation auf der Prozessebene zu ermöglichen und andererseits die Transparenz und Nachvollziehbarkeit von Entscheidungen sowie deren Rationalität zu erhöhen. Die hier vorgestellten Bewertungsmethoden und deren Ergebnisse dienen somit in der Regel als Entscheidungshilfen.

Diese **Bewertungsmethoden** bestehen in der Regel aus **vier Komponenten** (Lohse und Schnabel 2011, S. 547). Die erste Komponente ist das **Sachmodell**, das die gewählte Methode zur Abschätzung der Wirkungen eines verkehrsplanerischen Handlungskonzepts widerspiegelt. Die zweite Komponente ist das auf Widerspruchsfreiheit und Unabhängigkeit geprüfte **Werte- bzw. Zielsystem**. Die dritte Komponente sind **Bewertungsregeln bzw. -algorithmen**, die festlegen, welche erkannten Wirkungen welche Bewertung erhalten. Die vierte und letzte Komponente ist ein Bewertungsurteil bzw. die **Ergebnisse der Bewertung**.

Die **Methoden zur verkehrsplanerischen Bewertung** im Rahmen der Maßnahmenuntersuchung lassen sich in **drei Kategorien** anhand ihres Formalisierungsgrades einteilen: **nichtformalisierte, teilformalisierte** und **formalisierte Methoden**. Diese Einteilung hat sich in der Fachöffentlichkeit bereits weit verbreitet (Lohse und Schnabel 2011, S. 547ff; Boltze 2015). Der Grad der Mathematisierung der einzelnen Methoden steigt dabei mit dem Grad der Formalisierung, je höher der Formalisierungsgrad einer Methode, desto geringer sind die Freiheitsgrade für den Anwender bei Einsatz der Methode (Köhler 2014, S. 128). Einige Methoden, die sich der jeweiligen Kategorie zuordnen lassen, sind in Abbildung 3-15 auf der folgenden Seite dargestellt.

Methoden zur Bewertung verkehrsplanerischer Handlungskonzepte	
Nichtformalisierte Methoden	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verbal-argumentative bzw. intuitive Methoden</li> <li>▪ Argumentenbilanzierung</li> <li>▪ SWOT-Analyse</li> <li>▪ Expertenbefragung</li> <li>▪ Öffentliche Diskussion</li> <li>▪ Anwaltsmethode</li> </ul>
Teilformalisierte Methoden	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Öffentliche Diskussion</li> <li>▪ Anwaltsmethode</li> <li>▪ Vorteil-Nachteil-Analyse</li> <li>▪ Multikriterielle Wirkungsanalyse</li> <li>▪ Verträglichkeitsanalyse mit Eliminationsverfahren</li> <li>▪ Methode des paarweisen Vergleichs</li> <li>▪ Formalisiertes Abwägungs- und Rangordnungsverfahren</li> </ul>
Formalisierte Methoden	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nutzwertanalyse</li> <li>▪ Wirksamkeits-Kosten-Analyse</li> <li>▪ Nutzen-Kosten-Analyse</li> </ul>

Abbildung 3-15: Übersicht von Methoden zur verkehrsplanerischen Bewertung  
(Quelle: eigene Darstellung aufbauend auf Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2001).

Bei den **nichtformalisierten Methoden** werden die ermittelten Wirkungsprofile der verkehrsplanerischen Handlungskonzepte auf rein argumentativer und somit qualitativer Ebene bewertet (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2010, S. 15). Dies macht eine Bewertung weniger umfangreich, allerdings erhöht dies auch die Intransparenz bzw. den Grad der Subjektivität bei der Bewertung und erschwert den Vergleich der Handlungskonzepte, in Analogie zu den Ausführungen zu den Methoden zur Wirkungsabschätzung. Weiterhin erlauben nichtformalisierte Methoden die Bewertung von Kriterien, die nur schwer oder nicht quantifizierbar sind.

In die Kategorie der **formalisierten Bewertungsmethoden** fallen „...relativ exakt beschreibende und nachvollziehbare Verfahren, die durch Empfehlungen, Richtlinien oder staatliche Planungs- und Bewertungsverfahren (z.B. Bundesverkehrswegeplan) besondere Geltung erlangt haben“ (Lohse und Schnabel 2011, S. 552). Formalisierte Methoden ermöglichen einen quantitativen Vergleich verschiedener Handlungskonzepte, hierzu müssen jedoch häufig bestimmte Kenngrößen des Verkehrssystems in einheitliche Nutzen- oder monetäre Einheiten transformiert werden, was implizit bereits eine Bewertung darstellen kann. Bei den **teilformalisierten Methoden** handelt es sich schlussendlich um eine Mischform der beiden zuvor beschriebenen Kategorien von Bewertungsmethoden.

In den nachfolgenden drei Abschnitten werden jeweils schlaglichtartig einige Vertreter der verschiedenen Methoden-Kategorien vorgestellt, die Nutzwertanalyse wird wegen ihrer Bedeutung für den weiteren Verlauf der Untersuchung ausführlich beschrieben.



---

### 3.2.3.1. Nicht formalisierte Methoden

Das mit dem Einsatz von **nichtformalisierten Methoden** im Arbeitsschritt der Bewertung verbundene **Ziel** besteht grundsätzlich darin, diejenigen Handlungskonzepte identifizieren zu können, die **eindeutig ungeeignet** erscheinen, Beiträge zum definierten Zielsystem zu leisten oder deren Umsetzung gar **unzulässig** wäre (Köhler 2014, S. 128). Häufig in der Praxis zum Einsatz kommende, nichtformalisierte Methoden sind die verbal-argumentative bzw. intuitive Methode, eine Argumentenbilanzierung, die SWOT-Analyse, Expertenbefragungen, öffentliche Diskussionen sowie die Anwaltsmethode (Fornauf 2015, S. 58).

Die **verbal-argumentative Methode** nimmt eine Bewertung „...ausschließlich durch Argumentation und nicht durch arithmetische oder logische Aggregation vor ...“, weswegen auch kein systematisch abgeleitetes, umfassendes Zielsystem erforderlich ist (Fornauf 2015, S. 58). Wie auch bei der Wirkungsabschätzung, erfolgt eine Bewertung in Form eines Gesamturteils hinsichtlich eines Handlungskonzepts auf Basis der Erfahrung und dem persönlichen Wertesystem der bewertenden Person. Durch diese Subjektivität wird die Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Bewertungsergebnisse eingeschränkt, da Argumente, die zu der Bewertung geführt haben, selten hinterfragt werden (Scholles 2005, S. 97ff).

Die Methode der **Argumentenbilanzierung** setzt genau an diesem Kritikpunkt an. Durch eine Gegenüberstellung von positiven wie negativen Argumenten hinsichtlich eines Handlungskonzepts in Form einer finanzbuchhalterischen Bilanz sollen Bewertungsergebnisse nachvollziehbar und transparent darstellbar werden (Fornauf 2015, S. 58). Schließlich wird dasjenige Handlungskonzept gewählt, das die meisten positiven Argumente aufweist.

Wird die Argumenten-Bilanz eines Handlungskonzepts um die Felder bzw. Analysedimensionen „Risiken“ und „Chancen“ erweitert, entsteht eine sog. SWOT-Matrix, das zentrale Instrument der gleichnamigen **SWOT-Analyse** (Scholles 2008, S. 506). Das Akronym SWOT<sup>20</sup> steht zu Deutsch für Stärken, Schwächen, Risiken und Chancen als Analysedimensionen, hinsichtlich der ein verkehrsplanerischer Handlungskonzept untersucht wird. Die Methode selbst wurde aus der Betriebswirtschaft in die Verkehrsplanung übernommen (Schawel 2011, S. 182-183). Stärken und Schwächen stellen sog. endogene Faktoren dar, die somit durch die Bewertenden bzw. Entscheidenden direkt beeinflussbar sind. Exogene Einflussfaktoren, die Chancen und Risiken, können nur indirekt beeinflusst werden. Jedes Handlungskonzept wird im Zuge der SWOT-Analyse vergleichend in diesen vier Dimensionen analysiert und abschließend wird eines der Handlungskonzepte ausgewählt.

Da die **Expertenbefragung** bzw. die **öffentliche Diskussion** als Methoden der Wirkungsabschätzung auch als Bewertungsmethode einsetzbar sind, soll auf die Wiedergabe eines Verfahrensablaufs hier verzichtet und stattdessen auf die **Anwaltsmethode** eingegangen werden (Fornauf 2015, S. 61). Bei dieser Methode übernimmt ein Beteiligter am Bewertungsprozess die Rolle eines Anwalts für ein bestimmtes verkehrsplanerisches Handlungskonzept und fertigt für dieses Handlungskonzept ein strukturiertes Plädoyer an, das vor einem fiktiven Gericht vorgetragen werden muss. Das Gericht, ein entscheidungsbefugtes Gremium oder die Runde der Beteiligten am Verkehrsplanungsprozess, urteilt über das beste Handlungskonzept auf Grundlage der Plädoyers.

---

<sup>20</sup> SWOT: Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats (Schawel 2011, S. 182-183).

---

Die nichtformalisierten Methoden eignen sich prinzipiell, verschiedene Netzkonfigurationen für Systeme zur Energieversorgung von Elektro-Lastkraftwagen während der Fahrt oder die bauliche Ausstattungsfähigkeit von Streckenelementen zu bewerten, allerdings liegen hinsichtlich vieler Wirkungen bereits quantitative Erkenntnisse vor, sodass hier im Zuge der Bewertung dieser Wirkungen auch bereits teilformalisierte oder formalisierte Methoden angewendet werden können.

### 3.2.3.2. Teilformalisierte Methoden

**Teilformalisierte Methoden** verbinden Elemente der verbal-argumentativen Bewertung mit quantitativen Elementen der formalisierten Bewertungsmethoden. Sie gewähren damit einerseits Freiheitsgrade und ermöglichen andererseits den Vergleich zwischen verschiedenen Handlungskonzepten anhand bestimmter Kenngrößen, wodurch inferiore Handlungskonzepte identifiziert werden können. Zu den bekanntesten teilformalisierten Methoden zählen die Vorteil-Nachteil-Analyse, die Multikriterielle Wirkungsanalyse, die Verträglichkeitsanalyse in Verbindung mit dem Eliminationsverfahren, das Rangordnungsverfahren, die Methode des paarweisen Vergleichs, die öffentliche Diskussion sowie die Anwaltsmethode (Fornauf 2015, S. 61; Künne *et al.* 2005, S. 16; Scholles 2005, S. 99ff). Die Anwaltsmethode und die öffentliche Diskussion wurden bereits beschrieben, weswegen sie im Rahmen der Bewertung verkehrsplanerischer Handlungskonzepte zwar analog Anwendung finden, allerdings nicht erneut vorgestellt werden sollen.

Die **Vorteil-Nachteil-Analyse** baut auf der nichtformalisierten Methode der Argumentenbilanzierung auf, jedoch werden die erkannten Vor- bzw. Nachteile eines Handlungskonzeptes mit Punktwerten oder Symbolen (z.B. -, o oder „+“) bewertet (Fornauf 2015, S. 62). Hierzu sind Zielbereiche bzw. ein Zielsystem zu entwerfen und die Handlungskonzepte dann hinsichtlich ihres Zielerreichungsgrads zu bewerten. Die Bewertung eines Handlungskonzeptes ergibt sich bei der Vergabe von Punktwerten durch einfache mathematische Berechnungen (z. B. Summenbildung, arithmetisches Mittel) oder durch eine qualitative Bewertung bei Symbolen. Durch die Vorteil-Nachteil-Analyse wird es möglich, eine Rangfolge zwischen den Handlungskonzepten zu erstellen.

Die **multikriterielle Wirkungsanalyse** ist eine Weiterentwicklung der Vorteil-Nachteil-Analyse, für die ein Wirkungsprofil (Stärken-Schwäche-Profil) je zu bewertendem Handlungskonzept erstellt wird, das dann bewertet wird (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2010, S. 16ff). Die in das Wirkungsprofil eingehenden Kriterien müssen nicht zwangsläufig quantifizierbar sein, das Wirkungsprofil kann auch qualitativ bewertbare Kriterien enthalten. Wichtig ist allein, dass es möglich ist, je Kriterium eine Reihenfolge herbeizuführen, d.h. eine Ordinalskalierung der Kriterien. Hierdurch ist es möglich, eine Rangfolge der verschiedenen Handlungskonzepte hinsichtlich eines Kriteriums zu bilden. Ein Wirkungsprofil für ein fiktives Beispiel zur Bewertung einer Strategie im dynamischen Verkehrsmanagement ist in Abbildung 3-16 auf der folgenden Seite illustriert (entnommen aus Fornauf 2015, S. 64).

Die multikriterielle Wirkungsanalyse ermöglicht neben der **vergleichenden Bewertung** verschiedener Handlungskonzepte auch die **Bewertung einzelner Handlungskonzepte**, wenn diese vor dem Hintergrund ihrer Beiträge zur Zielerreichung untersucht werden (Fornauf 2015, S. 62). Eine abschließende Bewertung wird dann aber wieder verbal-argumentativ bewertet, eine formale Gewichtung der verschiedenen Kriterien ist bei der multikriteriellen Wirkungsanalyse nicht vorgesehen,

---



sodass hier eine implizite Gewichtung vorgenommen werden muss, was die Nachvollziehbarkeit der Bewertungsergebnisse erschwert.

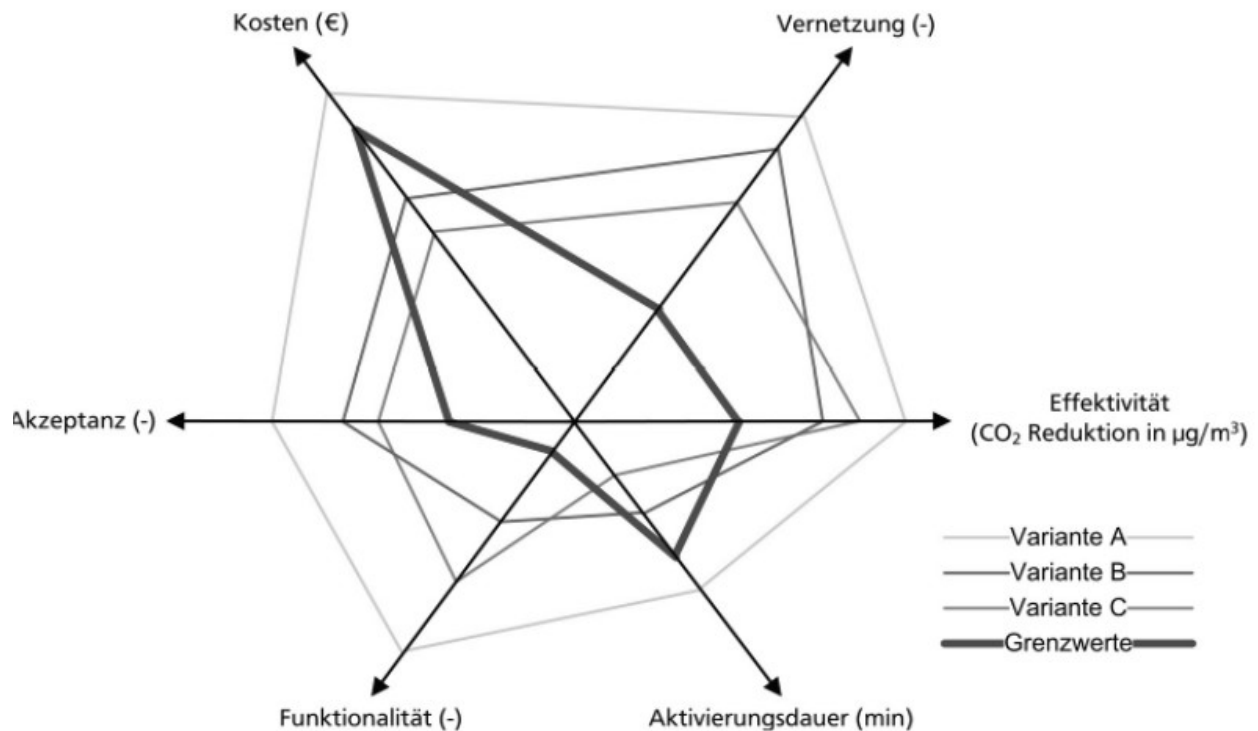


Abbildung 3-16: Illustration eines Wirkungsprofil  
(Quelle: Fornauf 2015, S. 64).

Die **Verträglichkeitsanalyse** ähnelt **in Verbindung mit dem Eliminationsverfahren** der multikriteriellen Wirkungsanalyse, allerdings wird neben dem Wirkungsprofil auch ein Anforderungsprofil definiert, mit dem die Wirkungsprofile verglichen werden (Scheiner 2003, S. 9ff). Im Anforderungsprofil werden Mindestwerte oder Vorgaben definiert, die die Handlungskonzepte z.B. auf Grundlage gesetzlicher Regelungen oder des technischen Richtlinienwerks erfüllen müssen. Eine Gewichtung der Kriterien kann implizit über die Verschärfung der definierten Mindestwerte geschehen. Ein Vergleich der Wirkungsprofile der einzelnen Handlungskonzepte mit dem Anforderungsprofil erlaubt dann, dass unzulässige Handlungskonzepte eliminiert werden können (Eliminationsverfahren). Zudem kann hierdurch auch eine Rangfolge der Wirkungsprofile erstellt und Aussagen zur resultierenden Qualität getroffen werden. Die Teilmenge der zulässigen Handlungskonzepte wird dann als Grundlage für die Abwägung und Entscheidung verwendet, allerdings ist auch möglich, durch iterative Verschärfung der Mindestwerte ein bestmögliches Handlungskonzept abzuleiten. Die Ergebnisse können z.B. in Form einer Kriterien-Spinne, wie sie Abbildung 3-16 zeigt, visualisiert werden.

Die **Methode des paarweisen Vergleichs** beruht, wie die Verträglichkeitsanalyse auch, auf einem interaktiven Vorgehen zur Rangfolgenermittlung zwischen einzelnen verkehrsplanerischen Handlungskonzepten (Schönharting 2005, S. 375-379). Wie sich bereits vermuten lässt, beruht diese Methode auf dem paarweisen Vergleich von jeweils zwei Handlungskonzepten, wofür in einem ersten Schritt „... zunächst die zu erreichenden Ziele, und die dafür zu untersuchenden Kriterien sowie

---

*Wirkungsfelder zu definieren, und die Wirkungen der einzelnen Varianten quantitativ oder qualitativ (z. B. mittels der verbal-argumentativen Methode) zu ermitteln...*“ sind (Fornauf 2015, S. 64). Zwei Wirkungsprofile werden hinsichtlich aller Bewertungskriterien miteinander verglichen und dasjenige Handlungskonzept ausgewählt, das mehr Vorteile als Nachteile aufweist. Diese Vergleiche werden solange durchgeführt, bis nur noch ein Handlungskonzept übrigbleibt. Der große Nachteil dieser Methode ist, dass der Bewertungsprozess nicht transparent und nachvollziehbar ist. Zudem können qualitative Aspekte nur schwer berücksichtigt werden.

Diese beiden Nachteile adressiert das sog. **Formalisierte Abwägungs- und Rangordnungsverfahren (FAR)**, das entgegen der Bezeichnung nicht zu den formalisierten Methoden zu zählen ist (Schönharting 2005, S. 376-379). Zunächst werden alle Handlungskonzepte daraufhin überprüft, ob sie bestimmte Mindestanforderungen erfüllen wie z.B. gesetzliche Bestimmungen. Jedes verbleibende Wirkungsprofil wird dann paarweise mit jedem anderen Wirkungsprofil verglichen und somit eine Rangfolge gebildet. Beim paarweisen Vergleich werden zweckmäßigerweise solche Handlungskonzepte ausgeschieden, die in allen Wirkungsbereichen anderen Handlungskonzepten übertroffen werden. Das Verfahren ist zwar sehr aufwändig, erlaubt jedoch, den Abwägungsprozess transparent nachzuvollziehen.

Die **teilformalisierten Methoden** wären prinzipiell dazu geeignet, das **Ausstattungspotential** deutscher Autobahnen mit **Systemen zur Energieversorgung des Elektroverkehrs während der Fahrt** zu bewerten. Angesichts des hohen finanziellen Aufwandes müssen die eingesetzten Verfahren jedoch den Vorschriften der Haushaltsordnungen des Bundes bzw. der Länder genügen, die in der Regel detaillierte, **formalisierte Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen** zwingend vorschreiben und somit den Einsatz nicht- und teilformalisierter Methoden erschweren (Pfäfflin 2017; Mühlenkamp 2015).

### 3.2.3.3. Formalisierte Methoden

Die **formalisierten Bewertungsmethoden** zeichnen sich durch relativ geringe Freiheitsgrade für den Anwender und einen hohen Grad der Mathematisierung aus. Dies bedeutet einerseits, dass qualitative Aspekte bei einer Bewertung in geringerem Umfang berücksichtigt werden können, andererseits werden die ermittelten Ergebnisse durch eine Vorgehensdokumentation sowie die hinter den Methoden stehenden Verfahrensregeln nachvollziehbar, reproduzierbar und transparent. Zu den formalisierten Methoden, die hier vorgestellt werden sollen, zählen die Kosten-Wirksamkeits-Analyse, die Nutzwertanalyse und die Nutzen-Kosten-Analyse.

Bei der **Kosten-Wirksamkeits-Analyse (KWA)** (engl. *cost-effectiveness analysis*) werden die Wirkungsprofile der einzelnen verkehrsplanerischen Handlungskonzepte mit den verbundenen Kosten in Verbindung gebracht und je Handlungskonzept ein Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis als Kennwert gebildet, der einen Vergleich der unterschiedlichen Handlungskonzepte ermöglicht (Hanusch *et al.* 2011, S. 161ff). Hierbei wird jedoch auf eine Monetarisierung der Wirkungen verzichtet, sie gehen in das Verfahren als direkt messbare bzw. physische Größe ein. Zur Durchführung einer KWA ist es zunächst notwendig ein Zielsystem zu definieren und Bewertungskriterien abzuleiten um dann je Handlungskonzept die entstehenden Kosten als auch die potentiellen Wirkungen abzuschätzen. Auf dieser Basis werden dann die ermittelten Kosten den Wirkungen, die als Zielerreichungsgrad abgebildet werden, gegenübergestellt und durch einen Quotienten ausgedrückt. Mit Hilfe der KWA ist es vor dem Hintergrund einer vorab definierten Kostengrenze bzw. mit einem verfügbaren Budget möglich, ungeeignete Handlungskonzepte zu identifizieren bzw. zu eliminieren, entweder weil die Kostengrenze

---

---

überschritten oder eine definierte Mindestwirksamkeit unterschritten wurde. Zudem ist die Bildung einer Rangfolge möglich, das Handlungskonzept mit dem besten Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis kann so bestimmt werden.

Die **Nutzwertanalyse (NWA)** umgeht das grundlegend bestehende Problem der notwendigen Monetarisierung ihrer Natur nach nicht-monetärer **Wirkungskriterien**, indem die einzelnen Wirkungskriterien eines Handlungskonzepts über ein Punktesystem verbunden, ggf. gewichtet und in einer **Kennzahl** zusammengeführt werden (Hanusch *et al.* 2011, S. 175ff; Höfler 2004, S. 71-76). Die NWA wird daher insbesondere dort eingesetzt, wo ökologische, ästhetische oder rechtliche Kriterien eine Rolle spielen, bei denen eine Monetarisierung besonders herausfordernd ist (Scheiner 2003, S. 6). Durch die Fokussierung auf die Wirkungen eines Handlungskonzepts stellt die NWA also eher die Effektivität eines Handlungskonzepts anstatt dessen Effizienz in den Mittelpunkt (Scholles *et al.* 2008, S. 431).

Eine Nutzwertanalyse wird in mehreren, aufeinander aufbauenden Schritten durchgeführt (Schönharting 2005, S. 373). Als erstes wird ein **Zielsystem** (ggf. geordnet in Ober- bzw. Unterziele) erstellt und die, in die Bewertung einzubeziehenden Kriterien werden dann definiert. Jedem Handlungskonzept wird anschließend für jedes **Wirkungskriterium** durch Abgleich mit einer vorab definierten **Bewertungsskala Punktwerte** zugeordnet. Die Bewertungsskala sollte ausreichend differenziert und nachvollziehbar sein. Für Bewertungskriterien, bei denen keine quantifizierbaren Daten, vorliegen können entsprechende qualitative Definitionen pro Bewertungsstufe formuliert werden. Die Bewertungskriterien können zusätzlich gemäß dem Zielsystem gewichtet werden. Somit entsteht je Bewertungskriterium ein Teilnutzwert, der durch Summation gemäß Formel 3-1 zu einem Gesamtnutzwert für jedes Handlungskonzept wird:

$$N_i = \sum_{j=1}^m n_{ij} = g_j * e_{ij} \quad (3-1)$$

Variablenbeschreibung:

$N_i$	Nutzwert der Alternative i
$n_{ij}$	Teilnutzwert der Alternative i in Bezug auf Kriterium j
$g_j$	Gewichtungsfaktor des Kriteriums j
$e_{ij}$	Punktwert der Alternative i in Bezug auf das Kriterium j

Formel 3-1: Ermittlungsvorschrift des Gesamtnutzwerts N eines Handlungskonzepts i bei der Nutzwertanalyse  
(Quelle: Hanusch *et al.* 2011, S. 176).

Die so ermittelten Nutzwerte (Punkte) stellen das Entscheidungskriterium dar, nachdem ein Handlungskonzept ausgewählt wird: dasjenige Handlungskonzept, das den höchsten Gesamtnutzwert aufweist, sollte zur Abwägung und Entscheidung vorgeschlagen werden. Um dem Abwägungscharakter einer politischen Entscheidung gerecht zu werden, können auch eine bestimmte Anzahl zulässiger Handlungskonzepte eingebracht werden. Ergänzende Sensitivitätsanalysen sollten, wie bei jeder

---

modellhaften Berechnung, insbesondere hinsichtlich der monetären Transformation und der Kriteriengewichtung durchgeführt werden.

Die **Nutzen-Kosten-Analyse (NKA)** ist die wohl bekannteste und in der Praxis beliebteste Methode zur Bewertung von Handlungskonzepten und findet nicht nur im Verkehrswesen sondern auch in anderen öffentlichen Sektoren Anwendung (Hanusch *et al.* 2011, S. 175ff; Höfler 2004, S. 68-71; Scholles 2005; Mühlenkamp 2015). Die Nutzen-Kosten-Analyse wird bspw. bei der Aufstellung des Bundesverkehrswegeplans (BVWP) zur volkswirtschaftlichen Bewertung einzelner Neubau- und Erweiterungsmaßnahmen des Verkehrsangebots eingesetzt (Heuser und Reh 2016, S. 251ff).

Die NKA greift zur Ermittlung des geeignetsten Handlungskonzepts auf die Bildung eines Quotienten des monetarisierbaren Nutzens einerseits sowie der relevanten Kosten andererseits zurück. Ein Nutzen-Kosten-Verhältnis größer eins drückt dabei aus, dass ein Handlungskonzept aus volkswirtschaftlicher Sicht realisiert werden sollte, da der erwartete Nutzen die Kosten übersteigt. Die Notwendigkeit einer zwingenden Monetarisierung der Nutzenkomponenten wird häufig an der NKA kritisiert, durch die Belegung mit einem Geldwert erfolge bereits eine implizite Gewichtung der Nutzenkomponente, z.B. der entstehende Umweltnutzen oder die Kosten von Personenschäden (Scheiner 2003, S. 2ff).

### 3.2.4. Modellbildung in der Verkehrsplanung

Mit Blick auf die Wirkungsabschätzung im Rahmen des Verkehrsplanungsprozesses haben sich zwei unterschiedliche dominierende Modellierungsansätze etabliert. Hier lassen sich **Verkehrsflussmodelle** und **Verkehrsnachfragemodelle** unterscheiden. Erhebungen zur Verkehrsnachfrage oder die Ergebnisse der Verkehrsnachfragemodellierung dienen als Eingangsgrößen der Verkehrsflussmodellierung, während die Ergebnisse der Verkehrsflussmodellierung als Parameter bei der Verkehrsnachfragemodellierung dienen können, z.B. bei den Widerstandsparametern des Verkehrsnetzes (Collin 2005).

In den folgenden beiden Abschnitten werden diese beiden Modelltypen näher vorgestellt, indem zunächst auf die Verkehrsflussmodelle und daran anknüpfend auf die Verkehrsnachfragemodelle für den Personenverkehr eingegangen wird. Da das Vorgehen zur Modellierung des Güterverkehrs zum Teil stark von dem bei der Modellierung der Personenverkehrsnachfrage abweicht, widmet sich dieser Abschnitt auch schlaglichtartig den Besonderheiten der Güterverkehrsnachfragemodellierung.

#### 3.2.4.1. Verkehrsflussmodelle

**Verkehrsflussmodelle** bedienen sich dem breiten **methodischen Spektrum der Simulation**, etwa der Warteschlangentheorie, der diskreten bzw. ereignisbasierten Simulation, der Multiagentensimulation oder den Zellularautomaten (Treiber und Kesting 2010; Brilon und Wu 2000). Sie modellieren die **Bewegung von Verkehrsteilnehmern** über Knotenpunkte, Streckenabschnitte oder Teilnetzausschnitte bei gegebener Verkehrsnachfrage (Cascetta 2009, S. 423 ff; Bungartz *et al.* 2013, S. 117ff). Die Verkehrsflussmodelle bilden die Entscheidungen der Verkehrsteilnehmer hinsichtlich des Verhaltens bei der Geschwindigkeitswahl, der Fahrstreifenwahl oder der Abstandswahl ab (Aleksic 2012). Erfasst werden verkehrstechnische Kenngrößen wie z.B. die Verkehrsdichte, Fahrzeugfolgezeiten oder

---

---

resultierende Wartezeiten mit dem Ziel weiterer Untersuchungen bspw. hinsichtlich sich einstellender Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs.

Zu unterscheiden sind hierbei drei Typen: **mikroskopische**, **mesoskopische** und **makroskopische Verkehrsflussmodelle**, je nachdem, wie einzelne Fahrzeuge bzw. Verkehrsteilnehmer modelliert werden. Sind die Verkehrsteilnehmer lediglich als kontinuierlicher Fluss abgebildet und werden wichtige, mit Hilfe des Modells ermittelte Kenngrößen aggregiert dargestellt, handelt es sich um eine makroskopische Verkehrsflusssimulation. Werden hingegen diese Kenngrößen auf disaggregierter Ebene einzelner Modellobjekte erfasst und werden diese als diskrete Elemente in der Simulation abgebildet, liegt eine mikroskopische Verkehrsflusssimulation vor. Dazwischen entwickeln sich seit einiger Zeit sogenannte mesoskopische Verkehrsflusssimulationen, die die Verkehrskenngrößen zwar aggregiert erfassen, jedoch die Modellobjekte als diskrete Elemente modellieren.

#### 3.2.4.2. Verkehrsnachfragemodelle

**Verkehrsnachfragemodelle** greifen die **individuellen Aktivitätenmuster** der Verkehrsteilnehmer auf um daraus die Entscheidungen der **Verkehrszielwahl**, der **Verkehrsmittelwahl**, der **Zeitwahl** und der **Routenwahl** unter Nutzung eines meist mehrere Modi umfassenden Verkehrsnetzmodells zu modellieren (Ortuzar und Willumsen 2011, S. 20ff). Im Ergebnis entstehen die Verkehrsverflechtungen einer Verkehrszelle mit jeder anderen Verkehrszelle im Untersuchungsraum, ggf. differenziert nach Verkehrsmittel als Verkehrsströme.

Mit dem Einsatz eines Verkehrsnachfragemodells sollen potentielle **Zustände des Verkehrssystems**, also zeitlich-räumliche Muster des Verkehrsgeschehens für einen bestimmten Untersuchungsraum, für einen bestimmten Prognosezeitpunkt abgeleitet werden können (Ortuzar und Willumsen 2011). Auf dieser Basis sollen die möglichen **Wirkungen verkehrsplanerischer Handlungskonzepte** untersucht werden können, indem mögliche Verhaltensänderungen der Modellobjekte auf die Handlungskonzepte abgebildet werden.

Zur Modellierung der Verkehrsnachfrage hat sich ein aus **vier Stufen** bestehendes Verfahren entwickelt, das konsequenterweise als sog. **Vierstufenverfahren** oder auch **Vier-Stufen-Algorithmus** bekannt geworden ist (Leih et al. 2015; Manheim 1976 bzw. 1980). Obwohl als Verfahren bezeichnet, bietet es vielmehr einen Rahmen zur Modellierung der Verkehrsnachfrage, innerhalb dessen ein Modellsubjekt nach individueller Problemstellung in jedem Verfahrensschritt separate Teilmodelle bilden, verknüpfen oder kombinierten kann. Üblicherweise werden zur Modellierung der Personenverkehrsnachfrage die folgenden Schritte unterschieden:

- der Verkehrserzeugung
- der Verkehrsverteilung
- der Verkehrsmittelwahl
- der Verkehrswegewahl und einer Verkehrsumlegung

Die **Grundlage** eines Verkehrsnachfragemodells umfasst in der Regel **Datenquellen zur Bevölkerungs-, Wirtschafts- und Raumstruktur**, der **Flächennutzung** sowie ggf. weitere **soziodemographischen**

---

**Daten** (Ortuzar und Willumsen 2011, S. 23). Basierend auf dieser Datenbasis wird zunächst als vorbereitende Arbeit zur Bildung des Verkehrsnachfragemodells das Untersuchungsraum in gleichwertige Verkehrszellen bzw. Verkehrsbezirke aufgeteilt, deren Größe und Homogenität wesentlich auf der Verfügbarkeit bzw. der Qualität der Datenbasis beruht. Die Verkehrszellen bzw. –bezirke werden durch ein meist intermodales Verkehrsnetzmodell miteinander verbunden, sodass das Verkehrsangebot im fokalen Verkehrssystem modellhaft abgebildet wird (Müller 2012, S. 46ff).

Das **Verkehrsangebotsmodell**, meist als Netzwerk im Sinne der Graphentheorie angelegt, umfasst neben Streckenabschnitten (Kanten) und Knotenpunkten (Knoten) auch entsprechende Attribute der Netzwerkelemente wie z.B. Informationen zu strecken- und knotenpunktbezogenen Kapazitäten, zur Verfügung stehenden Verkehrsmitteln, belastungsabhängigen Reisezeiten oder Fahrplankonzepte des ÖPNV. Die Attribute gehen in die im Verkehrsnachfragemodell abgebildeten Entscheidungssituationen als Parameter ein (Richter und Keuchel 2012). Eine Übersicht der Zusammenhänge zwischen der Datengrundlage einerseits sowie dem Verkehrsnachfrage- und Verkehrsangebotsmodell andererseits kann der nachfolgenden Abbildung 3-17 entnommen werden.

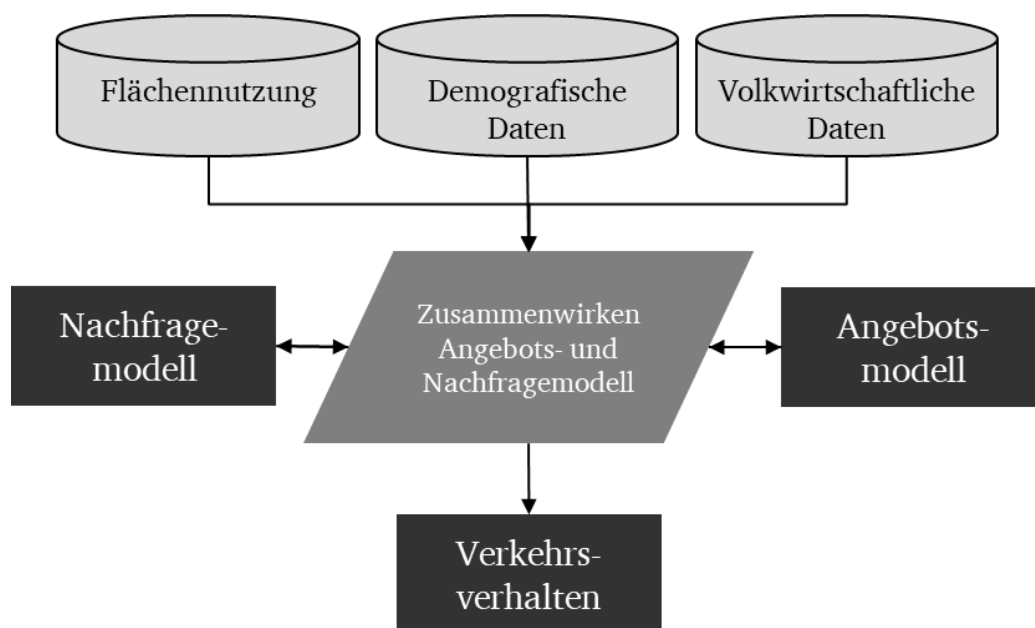


Abbildung 3-17: Zusammenwirken des Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodells  
(Quelle: eigene Darstellung basierend auf Cascetta 2009, S. 17ff).

Dem Verkehrsangebotsmodell wird ein entsprechendes **Verkehrsnachfragemodell** gegenübergestellt indem zunächst in einem ersten Modellierungsschritt mittels geeigneter Methoden die Wege der Personen (ggf. differenziert nach verhaltenshomogenen Gruppen) für den Untersuchungsraum als Quell- und Zielverkehre je Verkehrszelle ermittelt werden (Ortuzar und Willumsen 2011, S. 139ff). In einem zweiten Teilschritt werden die generierten Wege zwischen den Verkehrszellen verteilt, indem wiederum auf geeignete Methoden wie z.B. das Gravitationsmodell zurückgegriffen wird (z.B. Balster 2018). Die Verkehrsnachfragemodellierung in einem engeren Sinne erfolgt also durch das Abarbeiten der ersten beiden Stufen des Vierstufenverfahrens.



---

In einem dritten Schritt wird die Verkehrsmittelwahl für die erzeugten Quell-Ziel-Verbindungen entweder auf aggregiert oder auf disaggregierter Ebene unter Berücksichtigung individueller Entscheidungssituationen modelliert. Das **Verhalten der Modellobjekte** auf individueller Ebene wie auch in Form verhaltenshomogener Gruppen lässt sich anhand von verschiedenen Attributen, wie beispielsweise Reisezeit, Kosten oder Gewohnheiten abbilden (Winkler 2012, S. 26ff).

Im vierten Schritt werden die nun entstanden Fahrten auf einzelne Transportmittel verteilt und innerhalb des entsprechenden (Teil-)Verkehrsnetzmodells auf verschiedene **Routen** umgelegt (Ortuzar und Willumsen 2011, S. 349ff). Die Modellierung der Routenwahl-Entscheidung kann auch mit der Verkehrsmittelwahl zu einem sog. Simultanmodell kombiniert werden (Wermuth 2005; Vrtic 2003). Vor dem Hintergrund der Ausführungen dieses Abschnitts lässt sich folgern, dass Verkehrsnachfragemodelle im Wesentlichen die folgenden **Zustandsgrößen des Verkehrssystems** im Untersuchungsraum ableiten sollen:

- Die Anzahl der Ortsveränderungen von Personen beispielsweise differenziert nach:
  - Zeitscheibe
  - Verkehrsmittel
  - Verkehrszweck
- Räumlich und zeitlich differenzierte Inanspruchnahme des Verkehrsangebots zum Beispiel nach:
  - Knoten
  - Kanten
  - Knoten- oder Kantenhierarchien
- Weitere verbundene Kenngrößen, zum Beispiel:
  - Reisezeiten
  - mittlere Knoten- und Kantenwartezeiten
  - Wegelängen
- Eine beliebige, anwendungsfallspezifische Kombination der oben beispielhaft genannten Kenngrößen

Mit Hilfe der so ermittelten **Zustandskenngrößen** können **weitere Wirkungen** ermittelt bzw. modelliert werden, so z.B. **lokale Schadstoff-Emissionen, Fahrtkosten, Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs**. Zusätzlich können die Wirkungen eines sich verändernden Verkehrsangebots (z.B. Neu- oder Ausbau von Verkehrsanlagen) bzw. einer veränderten Verkehrsnachfrage (z.B. neu erschlossene Wohngebiete) auf die oben erwähnten Kenngrößen untersucht werden.



## Güterverkehrsnachfragemodelle

Mit dem vierstufigen Vorgehen existiert zur Modellierung des Personenverkehrs ein bewährter Bezugsrahmen als etablierter Stand der Wissenschaft. Bezüglich des Güterverkehrs ist dies auf Grund der in Abschnitt 2.2 beschriebenen, vielschichtigen und sich gegenseitig überlagernden Systemstrukturen sowie aus verschiedenen weiteren Gründen noch nicht der Fall (de Jong *et al.* 2013). Daher sind in der Regel Güterverkehrsnachfragemodelle anders aufgebaut als Verkehrsnachfragemodelle für den Personenverkehr, wie aus Abbildung 3-18 ersichtlich wird.

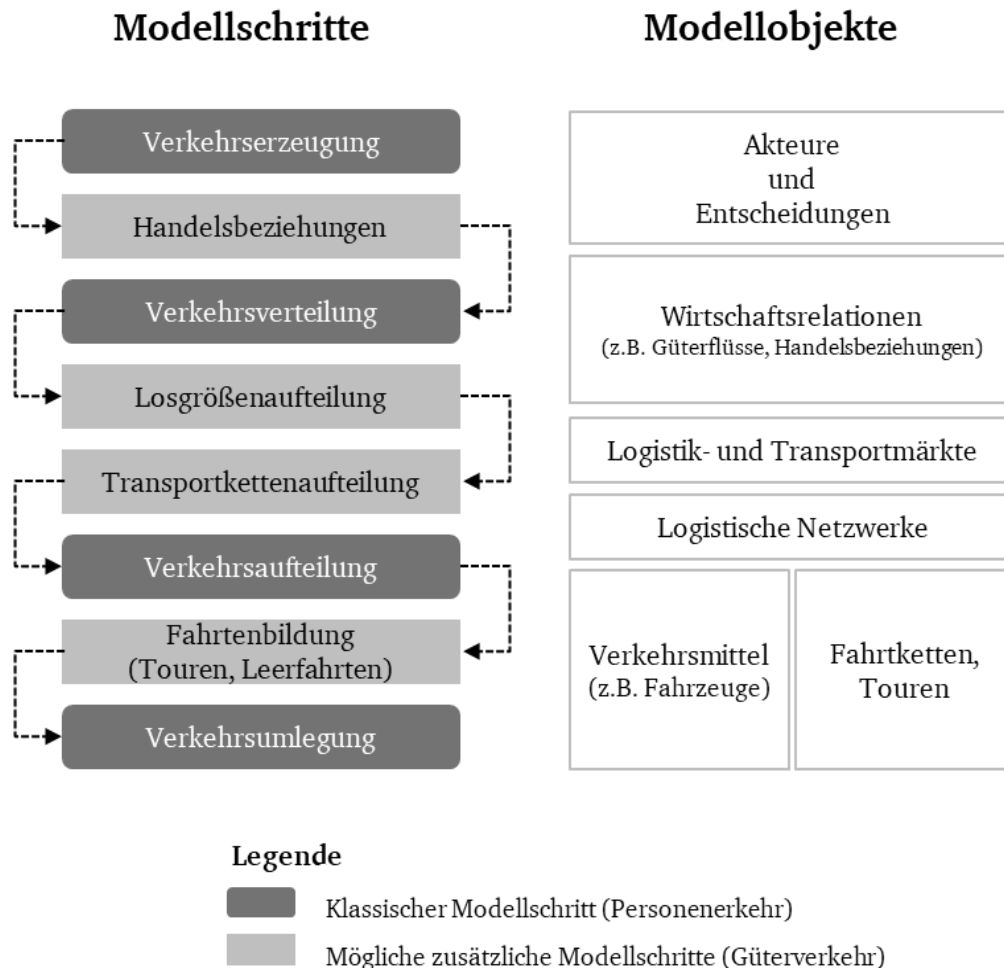


Abbildung 3-18: Modellschritte und Modellobjekte in Bezug auf die Modellierung der Güterverkehrsnachfrage  
(Quelle: eigene Darstellung basierend auf Friedrich und Liedtke 2009).

Mit dem Einsatz von Güterverkehrsnachfragemodellen wird das Ziel verbunden, die **Wirkungen von verkehrsplanerischen Handlungskonzepten** jeder Art (z.B. bestehend aus infrastrukturellen, regulatorischen oder preislichen Maßnahmen) im jeweils modellierten Güterverkehrssystem **vorhersagen** zu können. Nachfragemodelle für den Güterverkehr sollten daher so konzipiert werden, dass die **Entscheidungsstrukturen der Akteure** und die Kausalbeziehungen zwischen den Elementen des jeweils zu modellierenden Güterverkehrssystems **strukturähnlich** zum realen System **abgebildet werden**.

---

In diesem Kontext wird daher auch von der **Verhaltenssensitivität** der Modelle gesprochen, da das in Reaktion auf die unterstellte Umsetzung der Handlungskonzepte **angepasste Entscheidungsverhalten** der Akteure des Güterverkehrssystems möglichst genau dargestellt werden muss (Tavasszy und de Jong 2013; Ben-Akiva und de Jong 2013). Da es sich bei dem Modellobjekt der **Güterverkehrsnachfrage**, wie bereits dargestellt, um eine aus Wirtschaftsrelationen **abgeleitete Nachfrage** handelt, die überdies noch durch **logistische Entscheidung** zwischengeschalteter Logistik- und Transportdienstleister beeinflusst wird, sollten auch diese Entscheidungen eine Rolle bei der Modellierung der Güterverkehrsnachfrage spielen (Friedrich und Liedtke 2009).

Diese logistischen Entscheidungen der Akteure beziehen sich auf eine Reihe von Aspekten, die in Logistik- bzw. Transportsystemen vorzufinden sind, von denen an dieser Stelle jedoch nur Einige herausgehoben werden. Zum Ersten sollten reale **sektorale Wirtschaftsrelationen** zur Modellierung des Güteraufkommens im Planungsraum verwendet werden, sofern eine entsprechende Datengrundlage existiert (Friedrich *et al.* 2007). Zum Zweiten wird die Entscheidung über eine zu transportierende **Los- bzw. Sendungsgröße** auf Seiten der Verloader und Empfänger im Wege dieses wirtschaftlichen Austauschprozesses determiniert und sollte daher im Wege der Modellierung der Verkehrserzeugung Berücksichtigung finden (Piendl *et al.* 2019; Piendl *et al.* 2017; Combes 2013). Daneben sollte zum Dritten die Entstehung von **Transport- und Logistiknetzwerken** als Bindeglied zwischen den Wirtschaftsrelationen und den durchgeführten Transporten Eingang in Güterverkehrsnachfragemodelle finden (Liedtke und Friedrich 2012). Da in Logistiknetzwerken Größenvorteile beim Transport realisiert werden können, die sich wiederum auf die Gestaltung der Netzwerke selbst auswirken, sollte dies neben der Wahl der **Standorte für Lager und Depots** auch die Verbindungen der Standorte über **Transportketten** in Form von Linien- und Gelegenheitsverkehren umfassen (Friedrich 2010).

---

### 3.3. Bewertung des Reifegrades technischer Systeme

Für die **Bewertung** des bereits erreichten **Reifegrades technischer Systeme** im Allgemeinen und von ERS im Besonderen bietet sich das Konzept der Technologie-Reifegrade an (engl.: *Technology Readiness Level*, kurz TRL). Daher soll in diesem Abschnitt kurz das Konzept vorgestellt sowie die einzelnen TRL-Stufen beschrieben werden.

Das **TRL-Konzept** verdeutlicht, welche **Entwicklungsstufen** zu durchlaufen sind, um von einer ersten **Idee** hinsichtlich eines **Funktionsprinzips** und eines Einsatzgebiets (TRL 1) zu einem qualifizierten, sicheren und breit **akzeptierten System** zu gelangen, das nachweislich erfolgreich im geplanten Einsatzgebiet funktioniert (TRL 9). Entwickelt wurde das TRL-Konzept ursprünglich von der amerikanischen Raumfahrtagentur NASA für die Bewertung von Raumfahrttechnologien, davon ausgehend hat er sich als Standard in weiteren Bereichen entwickelt (Deutsches Institut für Normung, 2016). Der TRL wird mittlerweile auch von den Technischen Überwachungsvereinen (TÜV) oder der Bundesanstalt für Straßenwesen zur Beurteilung von der Reife von Technologien eingesetzt (o. A. 2019d bzw. 2019e). Die Merkmale der einzelnen TRL-Stufen stellt Tabelle 3-1 dar.

Tabelle 3-1: Technologiereifegrade gemäß der TRL-Skala  
(Quelle: Deutsches Institut für Normung 2016).

Level	Beschreibung
TRL 0	Nicht geprüfte Idee oder Konzept, es liegen keine Analysen oder Tests vor
TRL 1	Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips
TRL 2	Beschreibung der Anwendung der Technologie
TRL 3	Nachweis der Funktionsfähigkeit der Technologie
TRL 4	Versuchsaufbau im Labor
TRL 5	Versuchsaufbau in (simulierter/ vereinfachter) Einsatzumgebung
TRL 6	Prototyp in (simulierter/vereinfachter) Einsatzumgebung
TRL 7	Prototyp im (realen) Einsatz
TRL 8	Nachweis der Funktionsfähigkeit im Einsatzbereich (Zulassungsprozess abgeschlossen)
TRL 9	Technologie im Markt

Auf der Stufe **TRL 1** wurden gegenüber dem reinen Konzeptstatus des TRL 0 bereits grundlegende Funktionsprinzipien qualitativ beschrieben oder beobachtet. Zusätzlich ist die grundlegende wissenschaftliche Forschung bereits abgeschlossen, es wurden jedoch noch keine experimentell prüfbaren Ergebnisse produziert.

Ein technisches Konzept liegt auf Stufe **TRL 2** vor, die technische Anwendung und Durchführungskriterien wurden beschrieben. Zudem wurden kleinere Experimente als Konzeptprüfung des technischen Entwurfs durchgeführt. Stufe **TRL 3** umfasst bereits einen ersten Nachweis der

---

---

Funktionsfähigkeit der Technologie im Labor. Konzept und Durchführung haben sich im Rahmen der Laborversuche als erfolgreich erwiesen.

Auf Stufe **TRL 4** wurde ein Demonstrationsprojekt in einer laboratorischen und kontrollierten Umgebung aufgebaut. Durchführungen von Experimenten mit der Technologie unter diesen Rahmenbedingungen versprechen Erfolgchancen bei einer späteren Anwendung. Messungen bei diesen Experimenten haben die vorab getätigten analytischen Vorhersagen nicht widerlegt und ökonomische Evaluierungsmodelle wurden aufgestellt. Zur Erreichung des **TRL 5** musste eine Technologie sich in der relevanten Systemumgebung beweisen. Daneben wurde das technische Konzept hinsichtlich der Kriterien Qualität und Beständigkeit geprüft.

Ein Prototyp der Technologie hat bei Vorliegen von **TRL 6** in simulierter bzw. vereinfachter Einsatzumgebung bewiesen, dass das industrielle Potential eine Integration in reale Prozesse bzw. Umgebungen erlaubt. Bereits vorliegende Prototypen wurden außerdem modifiziert und ausgebaut. Die meisten Probleme in den vorherigen Phasen wurden behoben. Die Bewertung des Risikos und der Wirtschaftlichkeit wurden auf Basis der gesammelten Erkenntnisse angepasst. Zur Erreichung von **TRL 7** hat eine Prototypdemonstration bewiesen, dass die Technologie auf vorkommerzieller Ebene fehlerfrei funktioniert. Finale Herstellungs- und Realisierbarkeitshürden wurden bereits identifiziert und geringfügige technologische Schwierigkeiten wurden behoben.

Auf Stufe **TRL 8** kann eine Technologie fehlerfrei auf kommerzieller Ebene angewendet werden. Alle technischen Schwierigkeiten wurden gelöst. Auf der finalen Stufe **TRL 9** hat sich letztlich das gesamte System in der entsprechenden Umgebung bewiesen, die Technologie ist komplett entwickelt und das Produkt ist kommerziell zugänglich.

---

### 3.4. Zwischenfazit

*Zur Einordnung der Ausführungen im weiteren Verlauf dieser Arbeit in ihren jeweiligen Kontext musste in diesem Kapitel eine Reihe unterschiedlicher Methodenbezüge hergestellt werden. Aus diesem Grund wird es für den weiteren Untersuchungsverlauf als zielführend angesehen, auf einige zentrale Erkenntnisse dieses Kapitels im Wege eines Zwischenfazits im folgenden Abschnitt einzugehen.*

#### 3.4.1. Verkehrsplanungsprozess als Referenzrahmen

Der **Verkehrsplanungsprozess** eignet sich aus methodischer Sicht als strukturgebender Referenzrahmen, um Systeme zur Energieversorgung des Elektroverkehrs während der Fahrt auf gesamtgesellschaftlicher Ebene in Deutschland zu planen. Zudem ermöglicht er auch eine vergleichende Bewertung verschiedener Varianten oder Energieversorgungssysteme. Ein konkreter Prozess sollte in der Praxis dann so strukturiert werden, dass die Phasen der *Problemanalyse*, der *Maßnahmenuntersuchung* und insbesondere die politische *Abwägung und Entscheidung* Beiträge zu einem **hohen Erreichungsgrad der Ziele** im Sinne der Ausführungen in Kapitel 1 leisten. Hierfür ist einerseits eine möglichst umfassende und transparente Wirkungsabschätzung für jedes einzelne System zur Energieversorgung des Elektroverkehrs während der Fahrt notwendig. Andererseits sollten die ermittelten Wirkungen einer Bewertung vor dem Hintergrund eines aus gesamtgesellschaftlicher Sicht möglichst umfassenden Zielsystems zugeführt werden. Dies umfasst besonders eine Nutzen-Kosten-Untersuchung für möglichst viele Systeme.

Mit dem Ziel der Schaffung eines möglichst **breiten gesellschaftlichen Konsenses** hinsichtlich der Akzeptanz von Systemen zur Energieversorgung des Elektroverkehrs während der Fahrt bietet es sich auch an, auf den integrierten und zielorientierten **Verkehrsplanungsprozesses als Kommunikationsinstrument** zurückzugreifen. Der Verkehrsplanungsprozess eröffnet einerseits die Möglichkeit, politische Entscheidungsträger einzubinden und dadurch Interessenlagen, Risiken und Chancen zu identifizieren. Andererseits bietet er Beteiligungsmöglichkeiten für gesellschaftliche Gruppen wie TöB, Interessenverbände und weitere Akteursgruppen um die Akzeptanz und somit die Umsetzungswahrscheinlichkeit konkreter Handlungskonzepte zu erhöhen (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2013 bzw. 2012c).

Das im weiteren Verlauf dieser Arbeit vorgestellte Verfahren zur simulationsbasierten Optimierung der Ausstattung deutscher Autobahnen mit Systemen zur Energieversorgung von Lastkraftwagen während der Fahrt kann **Transparenz** über die Wirkungen **verschiedener Systeme** und bei gegebenem Bewertungsmaßstab auch über deren Zielbeitrag schaffen.

Da vermutlich ein erster Netzausbau in Deutschland auf dem Fernstraßennetz und nicht dem untergeordneten Netz erfolgen wird, bietet es sich im Zuge einer möglichen **institutionellen Verankerung** an, die Steuerung und die inhaltliche Bearbeitung der Phasen des Verkehrsplanungsprozess bei der **Autobahngesellschaft des Bundes** anzusiedeln. Die Autobahngesellschaft ist bundesweit für die Planung, den Bau, den Betrieb, die Erhaltung sowie die Finanzierung von Autobahnen verantwortlich (o.A. 2020c). Mit ihren regionalen Niederlassungen kann sie auch auf örtliches Fachwissen zurückgreifen. Aus diesem Grund verfügt sie sowohl über die verkehrsplanerische Methodenkompetenz wie auch die Umsetzungskompetenz im Hinblick auf die Planung und Steuerung konkreter Ausbauprojekte.

---

---

### 3.4.2. Wahl der Infrastruktur-Bewertungsmethode

Systeme zur Energieversorgung von Lastkraftwagen während der Fahrt stellen eine Technologieoption zur Transportdurchführung unabhängig von fossilen Brennstoffen dar. Das im Laufe dieser Arbeit entwickelte **Verfahren** soll aus diesem Grund dazu dienen, **unterschiedliche Netzkonfigurationen eines Systems** zur Energieversorgung des Straßengüterverkehrs während der Fahrt auf deutschen Autobahnen zu bewerten. **Perspektivisch** soll damit in weiteren Schritten auch die vergleichende **Bewertung mehrerer Systeme** möglich werden, wie in Deutschland bislang unterblieben. Die Bewertung der bautechnischen Machbarkeit einer Ausstattung einzelner Abschnitte des Autobahnnetzes mit den infrastrukturseitig zu verbauenden Komponenten solcher Systeme ist dafür eine Voraussetzung.

Zu diesem Zweck eignen sich vor allem die in Abschnitt 3.2.3 vorgestellten, **formalisierten Bewertungsmethoden**. Auf der einen Seite erfüllen sie die hohen **Anforderungen**, die aus **fiskalisch-rechtlicher Sicht** an Bewertungsmethoden bzw. Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen gestellt werden. Auf der anderen Seite sind sie aufgrund des **hohen Formalisierungsgrades** **objektiv** und **transparent**, die Bewertungsergebnisse sind daher **auch für Dritte nachvollziehbar**. Somit eignen sie sich auch aus verkehrswissenschaftlicher Sicht für eine Infrastrukturbewertung. Zudem bieten sie die **Möglichkeit einer multikriteriellen Bewertung** mit unterschiedlichen Gewichtungen, die vor Beginn dieser Untersuchung wegen des sich in Deutschland noch entfaltenden politischen Willensbildungsprozess noch nicht festgelegt worden sind. Überdies existieren mit Blick auf die Infrastrukturbewertung von Systemen zur Energieversorgung während der Fahrt nur **wenige qualitative Bewertungskriterien** (siehe Anhänge 1 und 2), sodass die Freiheitsgrade, die die nicht- bzw. teilformalisierten Methoden diesbezüglich bieten, auch nicht in Anspruch genommen werden müssen.

Mit Blick auf die vorgestellten formalisierten Bewertungsverfahren zeichnet sich die **Nutzwertanalyse (NWA)** durch die **beste Eignung** zur Bearbeitung der skizzierten Problemstellung aus. Zum ersten liegen **nicht für alle** in Frage kommenden **Bewertungskriterien** bereits **monetäre Transformationsgrößen** vor (oder die Kriterien lassen sich nicht oder nur schwer in eine monetäre Dimension transformieren).<sup>21</sup> Zum zweiten lässt sich eine **hohe Heterogenität der Wirkungskriterien** in Bezug auf deren **physische Größen bzw. Einheiten** erkennen. Auch hier sticht die NWA wegen der nicht notwendigen Transformation in eine einheitliche Dimension aus den Bewertungsverfahren heraus. Zum dritten lassen sich mit Hilfe der NWA **auch qualitative Kriterien** bewerten und in einen quantitativen Teilnutzwert übersetzen.<sup>22</sup> Viertens können Ergebnisse einer NWA im Wege einer Sensitivitätsanalyse auf ihre Robustheit geprüft werden, auch im Hinblick auf die Gewichtung unterschiedlicher Gruppen von Zielkriterien sodass die Folgen der Gewichtung transparent werden.

---

<sup>21</sup> Als prägnantes Beispiel hierfür dient mit Blick auf oberleitungsgebundene Systeme die Höhe von Straßenbauwerken über Fahrbahnoberkante: während eine Absenkung der Regelfahrdrahthöhe der Oberleitung in der Regel mit Mehrkosten verbunden ist, ist nicht quantifizierbar, mit welcher Höhe an Mehrkosten genau zu rechnen ist. Über die Vergabe von Punktwerten in Abhängigkeit der zu senkenden Distanz des Fahrdrahtes lässt sich dies aber im Wege der NWA berücksichtigen (siehe Abschnitt 5.4 zur Ableitung der Bewertungskriterien).

<sup>22</sup> So könnte z.B. das Risiko einer eventuell verlängerten Genehmigungs- bzw. Prozessdauer zur Erlangung des Baurechts durch Nähe zu Natur- und Vogelschutzgebieten im Wege einer Punkteskala abgebildet werden.

---

## 4. Systeme zur Energieversorgung des Elektroverkehrs während der Fahrt

---

*Ziel dieses Kapitels ist es, den Stand der Forschung und der Entwicklung von Systemen zur Energieversorgung des Elektroverkehrs während der Fahrt wiederzugeben. Gleichzeitig sollen wichtige Eingangsparameter für die Entwicklung eines Verfahrens zur simulationsbasierten Optimierung der Ausstattung deutscher Autobahnen mit Systemen zur Energieversorgung von Lastkraftwagen gewonnen werden. Auf internationaler Ebene sind solche Systeme unter der Bezeichnung Electric Road Systems (ERS), Electric Roads oder einfach eRoads bekannt (Schulte und Ny 2018).<sup>23</sup>*

*Zunächst werden in einem vorangestellten Abschnitt prinzipielle Formen von Systemen zur Energieübertragung und zur Energieversorgung des Elektroverkehrs diskutiert und daraus eine Klassifizierungssystematik für solche Systeme entwickelt. In einem weiteren Abschnitt wird dann überblicksartig auf den Stand der Technik bei Systemen zur Energieversorgung während der Fahrt eingegangen um danach ausgewählte Systembeispiele in weiteren Abschnitten eingehender zu analysieren. Das Kapitel endet mit einem zusammenfassenden Zwischenfazit.*

### 4.1. Systemklassifikation

Ein **Kraftfahrzeug** benötigt **Energie** zur **Fortbewegung** zwischen Quelle und Ziel. Zu diesem sog. Traktionsenergiebedarf kommen die **Bedarfe weitere Energiewandler** hinzu wie z.B. des elektrifizierten **Antriebsstrangs** oder des elektrischen **Bordnetzes** (12 bzw. perspektivisch 48 V). Bei den meisten Fahrzeugen setzen außerdem die Systeme zur **Heizung und Klimatisierung** der Fahrerkabine weitere Energie um. Bei **Lastkraftwagen** besteht darüber hinaus unter Umständen der **Bedarf zur Kühlung eines Aufbaus, Anhängers oder Aufliegers**.

Fahrzeuge mit einem **elektrischen Antriebssystem**, die auf dem Prinzip einer stationären Energieversorgung beruhen, führen im Fahrzeug einen auf Basis der typischen täglichen Fahrleistung des Fahrzeugtyps dimensionierten **Energiespeicher** mit. Die hierdurch **eingeschränkte, distanzbezogene Reichweite** eines Elektrofahrzeuges bzw. die sich daraus ergebende **Notwendigkeit zur Ladung** des Energiespeichers vor, während und nach einer Fahrt sind derzeit noch die beiden stärksten Hemmnisse für den Elektroverkehr. Sie gelten daher neben dem relativ hohen Kaufpreis als **Hauptgründe** für die **geringe Verbreitung von Elektrofahrzeugen** (Halbey *et al.* 2018).<sup>24</sup>

Wie bereits einleitend erwähnt, haben **Systeme**, die **nicht** auf dem **Prinzip** der **stationären Energieversorgung** von Fahrzeugen des Elektroverkehrs beruhen, sondern während einer Fahrt Energie zuführen können, das Potential, diese sog. **Reichweitenangst** (engl. *range anxiety*) zu **überwinden** (Franke und Krems 2013). Hinsichtlich dieses Energieversorgungsprinzips existiert bereits eine Vielzahl unterschiedlich weit entwickelter technologischer Ansätze. Um diese Ansätze geordnet und systematisch beschreiben zu können, wird daher in diesem Abschnitt ein **Klassifikationsschema** für diese **Systeme** vorgestellt.

---

<sup>23</sup> Im deutschsprachigen Raum existiert bisher keine ähnlich einprägsame und griffige Übersetzung, die Bezeichnung *Systeme zur Energieversorgung des Elektroverkehrs während der Fahrt* drückt den zu beschreibenden Sachverhalt aber treffend und präzise aus.

<sup>24</sup> Der Begriff *Batterie* wird sowohl im Volksmund als auch in weiten Teilen der verkehrswissenschaftlichen Fachöffentlichkeit benutzt, um fahrzeugseitig verbaute, elektrochemische Energiespeicher zu bezeichnen. Gemeint sind aber eigentlich Akkumulatoren. In dieser Arbeit wird durchgehend die neutrale Begriffsbezeichnung *Energiespeicher* verwendet.

---



---

## Klassifikationsmerkmal Energieversorgung

Die Versorgung eines Fahrzeugs mit der zur Bewegung und für andere Zwecke benötigten, **elektrischen Energie** kann nach **zwei verschiedenen Prinzipien** erfolgen. Das erste Prinzip kann als **stationäre Energieversorgung** bezeichnet werden. Bei Systemen, die auf diesem Prinzip beruhen, muss das Fahrzeug während der **Energieversorgung an Ort und Stelle verharren**. Im ungünstigsten Fall muss hierzu eine bereits begonnene Fahrt unterbrochen werden und der Energiespeicher für einen bestimmten Zeitraum von einem externen Energieträger versorgt werden. Technische Systeme, die auf diesem Prinzip beruhen, sind bislang am häufigsten anzutreffen (Jang 2018; Panchal *et al.* 2018).

Technische Systeme, die auf dem **zweiten Prinzip der Energieversorgung** beruhen, ermöglichen eine **Energieversorgung während der Fahrt**. Ein Fahrzeug wird also mit Energie versorgt, ohne dass es seine Fahrt unterbrechen muss. Bei schienenengebundenen Verkehrssystemen ist dieses Prinzip bereits etablierter Stand der Technik, es findet jedoch erst langsam Eingang in den Straßenverkehr (Biesenack 2006).

Hinsichtlich des zu entwickelnden Klassifikationsschemas von **Systemen zur Ladung von Fahrzeugen des Elektroverkehrs** bietet sich also als erstes Klassifikationsmerkmal an, diese **beiden Prinzipien der Energieversorgung** des jeweiligen Systems zu verwenden.

## Klassifikationsmerkmal Energieübertragung

Als zweites Klassifikationsmerkmal kann die **Form der Energieübertragung** bestimmter technischer Systeme herangezogen werden. Bezogen auf die Art der Verbindung zwischen Fahrzeug einerseits sowie den externen Energiequellen andererseits können **zwei unterschiedliche Übertragungsarten** von Energie identifiziert werden. **Konduktive Energieübertragungssysteme** nutzen eine physische Verbindung zwischen dem Fahrzeug und den externen Energieträgern während **induktive Energieübertragungssysteme** keinen Kontakt zwischen externem Energieträger und dem Fahrzeug benötigen (Schraven *et al.* 2011b).

Bei den konduktiven Systemen sind am häufigsten die **Steckerverbindungen** anzutreffen, wofür bereits eine eigene technische Norm erarbeitet wurde und die weiterentwickelt wird: der internationale Ladestandard IEC 62196 (International Electrotechnical Commission 2016). Das konduktive Laden per Steckerverbindung ist aber mit einer **Reihe von Einschränkungen** verbunden. Die grundsätzlich bestehende Handlungsnotwendigkeit des Fahrers kann im Vergleich zu einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor eine Komforteinbuße bedeuten und ruft einen zu leistenden Mehraufwand hervor, was sogar dazu führen kann, dass das Laden unter Umständen vergessen wird (Kiefer 2009). Zudem werden **hohe Anforderungen an die Sicherheit** des Benutzers und der Systemumwelt gestellt. Zum Schutz vor offenen elektrischen Kontakten und auftretenden Kriechströmen über Nässefilme müssen Kabel, Ladestation und Ladebuchse am Fahrzeug resistent gegen Witterungseinflüsse ausgeführt werden. Außerdem lässt sich eine offen hängende Steckverbindung kaum gegen **Vandalismus** schützen.

---

Neben den Steckerverbindungen kommen insbesondere bei Omnibussen des ÖPNV Systeme zum Einsatz, die mit klappbaren **Pantographen** Kontakt zu einer stromführenden Schleifleiste herstellen, der dann die Ladung des Fahrzeuges ermöglicht (Göhlich *et al.* 2018). Hierbei senkt sich entweder ein Pantograph an eine im Fahrzeug verbaute Schleifleiste oder ein im Fahrzeug verbauter Pantograph hebt sich an eine Schleifleiste. Den Systemen ist aber gemein, dass derzeit noch ein **geringer Grad der Interoperabilität** untereinander besteht.

In Abgrenzung zur konduktiven Energieübertragung besteht, wie bereits erwähnt, die Möglichkeit einer **induktiven d.h. kontaktlosen Energieübertragung** (Schraven *et al.* 2011b). Das Prinzip der induktiven Energieübertragung beruht auf der Wirkungsweise eines Transformators: zeitlich veränderlicher Strom in einer Primärspule erzeugt ein ebenfalls zeitlich veränderliches Magnetfeld, welches eine in der Nähe befindliche Sekundärspule teilweise überlagert (Hu 2009). Dieses Magnetfeld erzeugt in der Sekundärspule eine Induktionsspannung sowie letztlich einen zeitlich veränderlichen Strom. Das wiederum durch den Strom erzeugte magnetische Feld überlagert sich mit dem der Primärspule.

Geringe Übertragungsfrequenzen um 50 Hz lassen keine induktive Energieübertragung bei großen **Abständen zwischen Primär- und Sekundärspule** zu. Für einen breiten Einsatz der induktiven Energieübertragungstechnik ist die Transformation auf höhere Frequenzen im Bereich von 20–150 kHz eine Voraussetzung. Bestehende Induktionssysteme sind auf einen Abstand von ca. 10-20 Zentimetern zwischen Energieübertragungseinrichtung (sog. primäre Einheit) und Fahrzeug (sog. sekundäre Einheit) ausgelegt, die sekundäre Einheit im Fahrzeug selbst wiegt ca. 15 Kilogramm. Durch die Erdung der stationären Komponenten und einen Potentialausgleich über die Fahrzeugmasse erfolgt das induktive Laden **potentialfrei und berührungssicher**, wenn die Übertragungsstrecke unzugänglich gemacht wird. Die Verlegung der primären Einheit unter die Deckschicht einer Fahrbahn reduziert sowohl die Witterungseinflüsse auf die Komponenten als auch die Gefahr des Vandalismus. Da weder eine Kontaktbelastung zwischen primärer und sekundärer Einheit auftritt noch Kabelbrüche zu befürchten sind, entsteht gleichzeitig ein **geringer Verschleiß**, so dass sich der Wartungsaufwand im Vergleich zum konduktiven Laden reduzieren lässt. Zudem ist es denkbar, dass in der Fahrzeugkarosserie ein **Schutz vor den Störaussendungen** eingearbeitet wird.

Bei beiden Formen der Energieübertragung wird die resultierende **Ladedauer** maßgeblich durch die **Anschlussleistungen** der Ladepunkte bestimmt (Schraven *et al.* 2011a). Zusätzlich hängt die Ladedauer neben der Kapazität und der Entladetiefe des Energiespeichers davon ab, welche Art des **elektrochemischen Energiespeichers** verwendet wird. Grundsätzlich gilt: je schneller die Energie übertragen wird, desto stärker werden die Energiespeicher beansprucht und desto kürzer sind deren Lebensdauern.

Neben der induktiven und der konduktiven Energieübertragung gibt es noch zwei Sonderfälle in Form von **Wechselsystemen** und **Redox-Flow-Energiespeichern**. Bei den Wechselsystemen wird der komplette, entleerte Energiespeicher entnommen und durch einen geladenen Energiespeicher ersetzt. Bei einem Redox-Flow-Energiespeicher werden zwei durch eine Membran getrennte Reaktionspartner in einem Lösungsmittel zur Reaktion gebracht wodurch elektrische Energie freigesetzt wird. Im Falle einer Entladung des Energiespeichers, wenn also eine Redox-Reaktion vollständig abgelaufen und es weder ein Potential zur Oxidation noch zur Reduktion eines der beiden Reaktionspartner gibt, werden die beiden Nasszellen entnommen und durch Nasszellen ersetzt, die erneut zur Reaktion gebracht werden können (Arenas *et al.* 2017).

---

## Klassifikationsschema

Zur **Klassifikation** unterschiedlicher **Systemausprägungen** der Energieversorgung und der Energieübertragung elektrischer Fahrzeuge ergibt sich unter Bezugnahme auf die vorangegangenen Ausführungen in diesem Abschnitt das in Abbildung 4-1 dargestellte **Klassifikationsschema**. Hierin sind einige weiter verbreitete technische Systemlösungen festgehalten und ihren jeweiligen Formen der Energieversorgung und der Energieübertragung als Klassifikationsmerkmale zugeordnet worden.

Energie- übertragung	Energieversorgung	
	Stationär	Während der Fahrt
Konduktiv	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Ladestation mit Steckerverbindung</li><li>▪ Pantograph am Fahrzeug</li><li>▪ Pantograph an einer Ladestation</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Stromschiene seitlich</li><li>▪ Stromschiene von unten</li><li>▪ Oberleitungen</li></ul>
Induktiv	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Induktionsfelder</li><li>▪ Induktionsschienen</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Induktionsfelder</li><li>▪ Induktionsschienen</li></ul>
Andere	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Wechselsysteme</li><li>▪ Redox-Flow-Energiespeicher</li></ul>	

Abbildung 4-1: Formen der Energieversorgung elektrischer Fahrzeuge  
(Quelle: eigene Darstellung).

Mit **Blick** auf den **Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit**, die Systeme zur Energieversorgung des Elektroverkehrs während der Fahrt, werden **stationäre Systeme** in den nachfolgenden Abschnitten **nicht mit in die Betrachtung einbezogen**.

## 4.2. Systeme zur Energieversorgung des Elektroverkehrs während der Fahrt

Seit 2004 haben sich zahlreiche Forschungs- und Entwicklungsprojekte mit Technologien zur Energieversorgung des Elektroverkehrs während der Fahrt als Alternative zur fahrzeugseitigen Mitführung großer Energiemengen befasst. Bei Fertigstellung dieser Arbeit konnten insgesamt über **60 durchgeführte Projekte** identifiziert werden (eigene Recherche basierend u.A. auf Bateman *et al.* 2018). Aus verschiedenen Gründen wurden einige technische Systemlösungen nicht weiterverfolgt während andere technische Systeme im Rahmen von Feldversuchen weiter zur Marktreife entwickelt werden sollen.

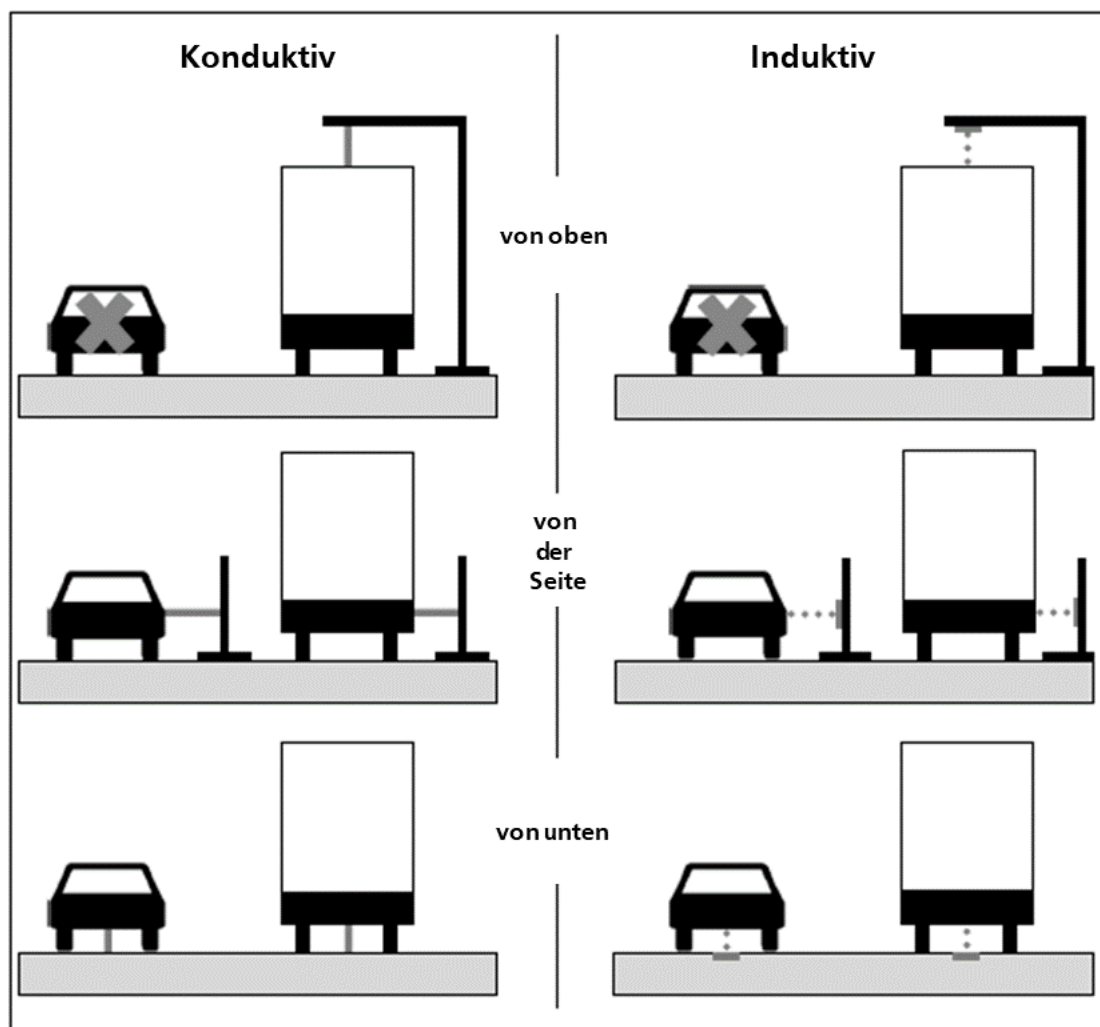


Abbildung 4-2: Anordnungsmöglichkeiten infrastrukturseitiger Komponenten  
(Quelle: aus dem Englischen übersetzt nach Connolly 2016).

Allen Energieversorgungssystemen des Elektroverkehrs während der Fahrt ist gemein, dass sie technische **Elemente** einerseits **im Straßenraum (infrastrukturseitig)** und andererseits **Elemente im Fahrzeug selbst (fahrzeugseitig)** benötigen. Aus einer bautechnischen bzw. planerischen Perspektive können die dazu notwendigen, **infrastrukturseitigen Systemelemente** entweder **über der Fahrbahn** bzw. den Fahrstreifen (d.h. von oben), **neben der Fahrbahn** bzw. den Fahrstreifen (d.h. von der Seite)

---

oder **auf der Fahrbahn** bzw. den Fahrstreifen (d.h. von unten) angeordnet werden. Werden diese Formen der Anordnung der infrastrukturseitigen Komponenten nun mit den Formen der Energieübertragung in Verbindung gebracht, ergeben sich die sechs in Abbildung 4-2 dargestellten, möglichen **Systemausprägungen zur Anordnung** im Straßenraum.

Auf Basis einer **Literatur- und Dokumentenanalyse** konnten insgesamt **zwölf verschiedene Systeme** zur Energieversorgung des Elektroverkehrs während der Fahrt identifiziert werden, die in den letzten Jahren in der Literatur oder als Forschungsprojekte vorgestellt worden sind. Dabei herrschen **konduktive Systeme** mit insgesamt **sieben** identifizierten Systemen vor. **Induktive Systeme** machen mit **fünf** vorgestellten Systemen nur eine Minderheit aus. Dies lässt sich einerseits mit dem hohen Neuheitsgrad induktiver Ladelösungen im Allgemeinen erklären. Andererseits haben viele Unternehmen, die konduktive Systemlösungen anbieten, ihr Kerngeschäft in der Bahnindustrie, wo ähnliche Systeme bereits für die Energieversorgung von Straßen- und Schnellbahnsystemen Verwendung gefunden haben. Diese Unternehmen suchen nun neue Geschäftsfelder für bereits relativ weit Systemlösungen.

### **Konduktive Systeme**

Eine Übersicht der während der Literaturanalyse identifizierten, **konduktiven** Systeme gibt Tabelle 4-1 auf der folgenden Seite. Die Tabelle zeigt die verschiedenen Systeme mit ihrer Bezeichnung, den an der Entwicklung beteiligten Organisationen, dem Ursprungs- oder Herkunftsland, der Richtung der Energieübertragung sowie einer Einschätzung hinsichtlich des zum Zeitpunkt der Verfassung dieser Arbeit zu konstatierenden TRL.

Auffällig ist hier einerseits, dass **drei der sieben Systeme in Schweden** entwickelt worden sind. Diese Vorreiterrolle Schwedens wird im Übrigen durch die Anzahl der themenbezogenen, wissenschaftlichen Veröffentlichungen unterstrichen. Je **ein System** stammt aus **Japan, Deutschland, Italien** und **Frankreich**. Perspektivisch stellt sich die Frage, wann Unternehmen aus **Schwellenländern** wie **China** und **Indien** mit eigenen Lösungen in den Wettbewerb eintreten werden, da die Regierungen beider Länder ambitionierte politische Programme zur Förderung des Elektroverkehrs verabschiedet haben und insbesondere auf heimische technische Systeme setzen wollen (Sharma 2018; o. A. 2018a).

Die **Energieübertragung von unten** wird dabei durch die **Mehrzahl** der Systeme als technische Lösung favorisiert, lediglich **jeweils ein System** nutzt dabei die Möglichkeit einer **Energieversorgung von oben bzw. seitlich**. Auch hinsichtlich des aktuellen **Technologiereifegrades** weisen die Systeme teils starke Unterschiede auf. Während einige Systeme, wie z.B. der *eHighway*, bereits im Rahmen von Feldversuchen die Praxistauglichkeit des Systems nachweisen wollen, gehen andere Systeme nicht über den Konzept-Status hinaus.

Tabelle 4-1: Übersicht konduktiver Systeme zur kontinuierlichen Energieversorgung des Elektroverkehrs  
(Quelle: eigene Darstellung).

Bezeichnung	Beteiligte	Herkunfts- land	Technology Readiness Level <sup>25</sup>	Richtung	Quellen
<b>Konduktiv</b>					
APS	▪ Alstom	Frankreich	TRL 4	von unten	▪ o. A. 2017b
Elonroad	▪ Elonroad ▪ Lund University ▪ Volvo ▪ Krafringen	Schweden	TRL 4	von unten	▪ o. A. 2019b
Elways	▪ Elvåg AB ▪ KTH University ▪ NCC ▪ Arlandastad Holding	Schweden	TRL 4	von unten	▪ o. A. 2019c
Slide-In	▪ Viktoria Swedish ICT ▪ Volvo GTT ▪ Scania CV ▪ Bombardier ▪ Vattenfall ▪ Lund University ▪ KTH University ▪ Chalmers University	Schweden	TRL 1	von unten	▪ Viktoria Swedish ICT 2014a
TramWave	▪ Ansaldo	Italien	TRL 1	von unten	▪ o.A. 2020d
Dynamic Charging System	▪ Honda	Japan	TRL 4	seitlich	▪ Tajima et al. 2015
eHighway	▪ Siemens ▪ Scania	Deutschland	TRL 5	von oben	▪ Siemens AG, 2012 ▪ Siemens AG et al. 2016

<sup>25</sup> Siehe Abschnitt 3.3

## Induktive Systeme

Über die **induktiven Systeme** zur Energieversorgung des Elektroverkehrs während der Fahrt gibt Tabelle 3-2 einen Überblick. Bei Betrachtung der Tabelle fällt auf, dass bei den in der Literatur vorgeschlagenen Systemen **ausschließlich** die **Energiezufuhr von unten** gewählt worden ist. Dies ergibt sich aus der Notwendigkeit eines möglichst geringen Abstands zwischen Primär und Sekundärspule zur Gewährleistung einer möglichst hohen Ladeleistung. Während eine Energiezufuhr aus seitlicher Richtung noch im Grundsatz machbar erscheint, ist wahrscheinlich nicht mit Systemen zu rechnen, die auf die Energiezufuhr von oben zurückgreifen werden.

Tabelle 4-2: Übersicht induktiver Systeme zur kontinuierlichen Energieversorgung des Elektroverkehrs (Quelle: eigene Darstellung).

Name	Beteiligte	Herkunftsland	Technology Readiness Level <sup>26</sup>	Richtung	Quellen
<b>Induktiv</b>					
OLEV	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Dongwon OLEV</li> <li>▪ Korea Advanced Institute of Science and Technology</li> </ul>	Südkorea	TRL 7	von unten	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lee et al. 2010</li> </ul>
Primove	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bombardier</li> </ul>	Frankreich	TRL 4	von unten	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ o.A. 2017c</li> </ul>
Slide-In	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Viktoria Swedish ICT</li> <li>▪ Volvo GTT</li> <li>▪ Scania CV</li> <li>▪ Bombardier</li> <li>▪ Vattenfall</li> <li>▪ Lund University</li> <li>▪ KTH University</li> <li>▪ Chalmers University</li> </ul>	Schweden	TRL 5	von unten	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Viktoria Swedish ICT, 2014b</li> </ul>
Unbekannt	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nissan</li> </ul>	Japan	TRL 2	von unten	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Connolly 2016</li> </ul>
Polito IPT	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Politecnico di Torino</li> <li>▪ Centro Ricerche Fiat</li> </ul>	Italien	TRL 4	von unten	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ o. A. 2017a</li> <li>▪ Amditis et al. 2016</li> </ul>

Auch bei den induktiven Systemen sind **Unternehmen bzw. Forschungseinrichtungen** aus **Schweden** an einer vergleichsweise weit entwickelten Technologie beteiligt. <sup>27</sup> Daneben wird je ein System in **Frankreich, Japan, Südkorea** und **Italien** entwickelt. Neben den hier aufgeführten, induktiven Systemen wird derzeit in **China** an einer sog. **Solar Road** gearbeitet (Hanley 2017). Dieses System nutzt Solarzellen und einen transparenten Asphalt und soll in Zukunft auch zur induktiven Energieversorgung der Fahrzeuge weiterentwickelt werden. Allerdings gingen die Überlegungen bei Fertigstellung dieser

<sup>26</sup> Siehe Abschnitt 3.3

<sup>27</sup> Auch hier erfolgte die Einordnung auf Basis eines qualitativen Vergleichs des publizierten Entwicklungsstandes mit den Definitionen der einzelnen TRL.



---

Arbeit nicht über einen groben Konzeptstatus hinaus, sodass diese Technologie hier nicht weiter vertieft werden soll, auch wenn sie einen durchaus hohen Nutzen aufweisen könnte.

Sowohl die **Energiezufuhr von der Seite** als auch die **von unten** sind in ihren konduktiven und induktiven Ausprägungen jeweils für Pkw und Lastkraftwagen bzw. Busse geeignet. Eine Systemlösung basierend auf dem Prinzip einer **Energiezufuhr von oben** erscheint im Hinblick auf die bisher präsentierten technischen Systeme für Pkw wenig realistisch, da der Abstand zwischen Pkw und infrastrukturseitigen Elemente als zu hoch anzusehen ist, um mittels eines Pantographen oder über Induktionsladung überbrückt werden zu können. Für den Bus- und Güterverkehr mit schweren Nutzfahrzeugen sind Systeme mit Energiezufuhr von oben jedoch wegen der eher geringen zu überwindenden Höhendifferenz gut geeignet.

Basierend auf den TRL-Einstufungen der identifizierten Systeme einerseits und bezogen auf die Anordnung der Systemkomponenten andererseits werden daher in den folgenden Abschnitten die **konduktiven Systeme eHighway und Elonroad** vorgestellt. Zusätzlich soll als einzigem Vertreter für ein seitlich angeordnetes, konduktives System das **Dynamic Charging System** vorgestellt werden. Bei den **induktiven Systemen** wird mangels weiterer Alternativen hinsichtlich der Richtung der Energiezufuhr lediglich das **OLEV-System** vorgestellt, das die Energie von unten überträgt und hier am weitesten entwickelt ist.

Energie- übertragung	Anordnung der infrastrukturseitigen Komponenten		
	▪ von oben	▪ seitlich	▪ von unten
▪ Konduktiv	▪ eHighway	▪ Dynamic Charging System	▪ ElonRoad
▪ Induktiv			▪ OLEV

Abbildung 4-3: Mögliche Ausprägungen von ERS  
(Quelle: eigene Darstellung basierend auf Connolly 2016, S. 6).

### 4.3. Konduktive Systeme

In diesem Abschnitt werden die konduktiven Energieversorgungssysteme eHighway, das Dynamic Charging System von Honda sowie Elonroad vorgestellt. Für jedes der Systeme wird der zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit erreichte, technische Reifegrad aufgezeigt, indem der technische Entwicklungsprozess nachvollzogen wird. Zudem wird einleitend der technische Systemaufbau dargestellt.

#### 4.3.1. eHighway

##### 4.3.1.1. Übersicht

Das **eHighway** System soll auf einer Schnellstraße die Energieversorgung von Lastkraftwagen auf dem in Fahrtrichtung rechten Fahrstreifen mittels Oberleitungen erlauben. Zu den **Elementen** des **eHighway-Systems** zählen einerseits diejenigen Elemente, die der **Oberleitungsinfrastruktur** zugeordnet werden können. Dies sind im Wesentlichen die **Gleichrichtunterwerke**, die **Masten** und **Quertrageeinrichtungen**, die **Fahrleitungen** sowie die **elektrischen Schutzeinrichtungen**. Hinzu kommen ggf. **Betriebsleitstände** und **mechanische Schutzeinrichtungen** zum Aufprallschutz, falls sie vor Ort errichtet werden müssen (Wietschel *et al.* 2017, S.19). Diese Elemente können unter dem Oberbegriff **straßenseitige Elemente** zusammengefasst werden.

Andererseits gehören **fahrzeugseitige Elemente** zum eHighway-System. Hierzu zählen zum Beispiel der **Stromabnehmer**, der **Energiespeicher** oder der **Antriebsstrang**. Die Teil- oder Subsysteme des eHighway sind in Abbildung 4-4 dargestellt.

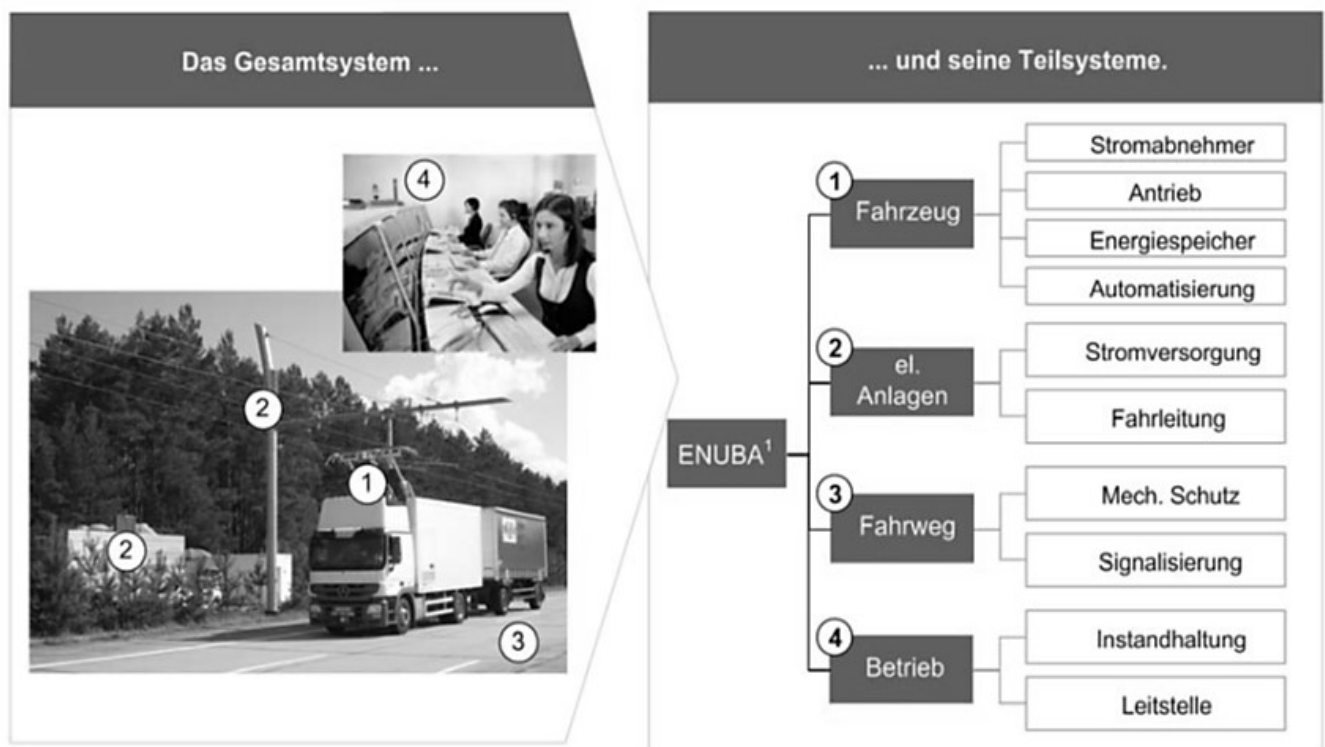


Abbildung 4-4: Systemaufbau eHighway  
(Quelle: Siemens AG 2012, S. 23).

---

Grundsätzlich ist es möglich, **Ladesysteme** als **Gleichspannungs-** (DC) oder **Wechselspannungssysteme** (AC) auszulegen. Das **Gleichspannungssystem** wird meist gegenüber einem Wechselspannungssystem aufgrund seines **geringeren Energieumwandlungsbedarfs** am Fahrzeug und den **geringen Unterwerksabständen bevorzugt**. Ein Wechselspannungssystem ist hingegen dann sinnvoll, wenn das Spannungsgefälle im Fahrleitungsnetz reduziert werden muss (Siemens AG 2012, S.26). In Bezug auf den *eHighway* wurde daher bereits festgelegt, dass aufgrund elektro- und fahrzeugtechnischer Abwägungen eine **Serienanwendung** der **Gleichstromversorgung** der Fahrzeuge mit **750 V oder 1500 V DC** gegenüber einem Wechselspannungssystem zu bevorzugen ist.

#### 4.3.1.2. Technischer Systemaufbau

Dem *eHighway*-System wird elektrische **Energie aus Gleichstromunterwerken** bereitgestellt, die in **standardisierten Seefracht-Containern** (40 Fuß) untergebracht werden und so recht einfach und raumsparend entlang der Strecke errichtet werden können (Siemens AG 2016). Die **Unterwerke** werden über Einspeisepunkte aus dem lokalen Mittelspannungsnetz versorgt und übernehmen im *eHighway*-System die Aufgabe der Wandlung von elektrischen Strömen von einer Nennspannung von 20 kV AC in eine Nennspannung von 650 V DC. Über **Einspeisemasten** wird der umgewandelte Strom dann in das Fahrleitungsnetz eingeleitet. Zur Energieversorgung der **Fahrleitung** werden sowohl entlang der Fahrbahn als auch quer zur Fahrbahn Verstärkungs-, Speise-, Umgehungs- und Schalterquer- sowie Fallleitungen verlegt. Die Versorgungsleitungen können sowohl als Freileitungen als auch als Erdkabel ausgeführt werden. Erdkabeltrassen werden unterirdisch in einem maximalen Abstand von 5 m zur Fahrbahnkante verlegt. Die Übertragung von den Unterwerken auf die Einspeisemasten erfolgt mit Bahnstromkabeln, mittels eines Übertragungsableiters gegen äußere Überspannungen geschützt werden.

Aus einem Unterwerk kann die Einspeisung elektrischer Energie einseitig oder zweiseitig erfolgen. Grundsätzlich spielen bei der **Dimensionierung einer eHighway-Ladestation** die Fahrzeuganzahl, die Fahrzeugeigenschaften und das Fahrverhalten eine wichtige Rolle. Bei einer durchschnittlichen Fahrzeuglänge von 18 Metern, einem minimalen Fahrzeugfolgeabstand von zwei Sekunden und einer Geschwindigkeit von 80 km/h können z.B. je Längenkilometer einer Ladestation maximal 16 Fahrzeuge fahren und mit Energie versorgt werden (Wietschel *et al.* 2017, S.23-24). Im Bereich eines Unterwerks, das als Einspeiseabschnitt drei Ladestations-Kilometern in jede Richtung zu versorgen hat, ist also die Bedienung von ca. 100 Lkw bei maximaler Beharrungsgeschwindigkeit möglich. Soll die Kapazität eines Einspeiseabschnitts weiter gesteigert werden, bieten sich Maßnahmen wie die Verdichtung von Unterwerken, der Einbau von Energiespeichern in den Unterwerken, die Installation eines Kommunikationssystems zwischen Lkw und Unterwerk zur situationsabhängigen Regelung der Leistungsaufnahme oder die lokale Verstärkung des Mittelspannungsnetzes an.

Zur Energiezufuhr an die Fahrzeuge werden **Oberleitungen** verwendet. Sie werden oberhalb der oberen Fahrzeugbegrenzungslinie des Verkehrsraumes mit Hilfe von Masten oder Trageeinrichtungen angebracht (Siemens AG *et al.* 2016). Grundsätzlich können verschiedene Ausführungen von Fahrleitungssystemen unterschieden werden: eine **Einfachfahrleitung** kann ebenso zum Einsatz kommen wie eine **Kettenwerksfahrleitung** oder eine **Flachkettenfahrleitung**. Für eine erste Versuchsanlage wurden Kettenwerksfahrleitungen mit versetzten Stützpunkthängern auf geraden

---

---

Strecken eingesetzt sowie Kettenwerksfahrleitungen mit windschiefer Aufhängung im Bereich von Kurven. Das Kettenwerk besteht aus einem Fahrdraht, einem Tragseil sowie aus stromfesten Hängern aus Seil- und Festpunktankern. Für die Oberleitungsinfrastruktur werden zwei Kettenwerke mit einem mittleren Abstand der Fahrdrähte von 1,35 m errichtet. Das Tragseil und der Fahrdraht werden mit Hilfe von Radspannern nachgespannt. Die **Regelfahrdrathöhe** beträgt 5,1 m aber unter Einhaltung von bestimmten weiteren Randbedingungen kann diese unter Brücken, Schilderbrücken und kreuzenden Fahrleitungen auf 4,5 m verringert werden.

Bei der Dimensionierung der **Masten und Quertrageeinrichtungen** haben sowohl Höheneinschränkungen als auch die bestehende Seitenraumgestaltung an einem Querschnitt Auswirkungen auf die Ausführung der Quertrageeinrichtungen und Masten (Siemens AG *et al.* 2016). Die wesentliche Funktion der Quertrageeinrichtungen ist die **Fixierung der Fahrleitung** im Stromabnehmerbereich der Fahrzeuge über dem zu versorgenden Fahrstreifen. Bevorzugt werden Materialien wie Stahl, Aluminiumlegierungen oder glasfaserverstärkter Kunststoff eingesetzt. Daneben zählen zu den Quertrageeinrichtungen die Seilkomponenten mit speziell hergestellten Fahrleitungsarmaturen sowie mechanischen und elektrischen Klemmen. Weiterhin wird die Ausführung der Quertrageeinrichtung durch die Art der verwendeten Fahrleitung bestimmt.

Die Wahl der **Ausführungsart der Masten** ist abhängig von der **Gründungsart**, den aufzunehmenden Kräften und gestalterischen Gesichtspunkten (Siemens AG *et al.* 2016). Die Maste werden auf **Gründungen** auf- oder eingesetzt und mit den Fundamenten verschraubt. Die Gründungen für die Verankerung der Masten dienen der Einleitung der vertikalen und horizontalen Kräfte der Oberleitungsanlage, welche aus den einzelnen Gewichtskräften der Bauteile, den Nachspannkräften der Kettenwerke und Verstärkerseilen sowie aus Zusatzlasten durch Wind und Eis entstehen. Sie können als **Schwergewichtsgründung**, **Pfahlgründung** oder als seitlich **eingespannte Gründung** ausgeführt werden. Für die Gründungsarbeiten müssen im Voraus die **Maststandorte** vermessungstechnisch ermittelt und einzeln statisch begutachtet werden.

Folgende **Bestandteile** von **Autobahn-Regelquerschnitten** und Seitenräumen haben einen **Einfluss** auf die **Positionierung und Bemaßung der Maste**: Randstreifen, Standstreifen, Bankett, Rückhalteeinrichtung und Entwässerungseinrichtung. Weiterhin spielen Geländeform, Trinkwasserschutzgebiete in der Nähe, Lärmschutzeinrichtungen, Notrufsäulen, Rastanlagen und die Ausprägungen von Knotenpunkten und Anschlussstellen eine Rolle. Aus diesem Grund müssen in der Regel für jeden Masten statische Berechnungen durchgeführt werden.

#### 4.3.1.3. Entwicklungsstand

Das *eHighway*-System trug ursprünglich den Namen ENUBA, was gleichzeitig aber auch die Bezeichnung für zwei Forschungsprojekte war (Siemens AG 2012). Vermutlich um Verwechslungen zu vermeiden und einen aus Sicht der späteren Vermarktung günstigeren Namen zu vergeben, wurde das System dann in *eHighway* umbenannt. Das *eHighway*-System ist das bisher einzige System zur Energieversorgung des Elektroverkehrs von oben.

Bisherige Meilensteine der Entwicklung des *eHighway*-Systems waren zum einen der **Funktionsnachweis des Systems** als Gesamtkonzept in einem ersten Entwicklungsprojekt (ENUBA)

---

sowie zum anderen die prototypische Integration eines modifizierten und mit Regelungs- und Steuerungstechnik ausgestatteten Stromabnehmers in den knappen Bauraum einer Sattelzugmaschine in einem weiteren Forschungsprojekt namens ENUBA 2 (Siemens AG 2012; Siemens AG *et al.* 2016). Außerdem wurde im brandenburgischen Groß Döln eine ca. 2,5 Kilometer lange, nicht-öffentliche **Versuchsanlage** auf einem abgegrenzten, ehemaligen Militärflughafen errichtet. Die Teststrecke wurde mit realitätsnahem Zubehör einer Autobahn (Fahrzeugrückhaltesystem, Schilderbrücken, Beschilderung auf Kragarm) ausgestattet worden ist. Zudem wurden mehrere Lkw zu sog. **Oberleitungs-Hybrid-Lkw (OH-Lkw)** als Versuchsfahrzeuge umgerüstet.

Parallel zur technischen Entwicklung des *eHighway*-Systems selbst wurden Untersuchungen zu seinen wirtschaftlichen und ökologischen Wirkungen durchgeführt, an dessen Ende der **Nachweis der Wirtschaftlichkeit und der positiven Umweltwirkungen** des Systems stand (Wietschel *et al.* 2017). Auch die bauliche, betriebliche und sicherheitstechnische Integration in den Verkehrsraum wurde detailliert analysiert und in Konzepten und Musterprojektierungen dokumentiert.

Die so abgeleiteten Empfehlungen, Auflagen und Auslegungsrichtlinien bereiten die **Erprobung im öffentlichen Raum** vor. Die im Rahmen des Projekts ENUBA 2 errichtete, Versuchsanlage ist trotz ihrer realitätsnahen Gestaltung als Versuchsaufbau zu charakterisieren. Damit erfüllt die räumliche Koordination von Stromversorgung und Fahrleitung entlang einer autobahnähnlich ausgerüsteten Fahrbahn die Merkmale von TRL 5. Nach Abschluss von ENUBA 2 wurde somit die notwendige technologische Reife erreicht, um das *eHighway*-System im Rahmen erster **Pilotprojekte im öffentlichen Raum** zu erproben. Die wesentlichen Ergebnisse der beiden wegbereitenden Forschungsprojekte ENUBA und ENUBA II sind in Tabelle 4-3 zusammengefasst.

Mit einer kurzen Strecke im öffentlichen Raum von ca. zwei Kilometern Länge je Fahrtrichtung und einigen wenigen Erprobungsträgern verschiedener Fahrzeughersteller begann eine **Demonstration des eHighway-Systems** im Frühjahr 2016 in **Schweden** (Hartmann 2016). Schwerpunkte dieses Demonstrationsprojekts ist das Sammeln erster Erfahrungen zur betrieblichen Alltagstauglichkeit des *eHighway*-Systems sowie die Untersuchung der Kombinationsfähigkeit mit verschiedenen Antriebskonzepten für schwere Nutzfahrzeuge, die sowohl Kombinationen als Parallelhybride mit einem Dieselmotor sowie auch innovative Kombinationen mit Erdgasantrieben oder großen Energiespeichern für die nicht elektrifizierten Streckenabschnitte vorsehen.

Der **Umfang** und die Zielrichtung dieses Demonstrationsprojekts **entspricht jedoch nicht qualifizierten Feldversuchen**, bei denen im größeren Umfang Transporte in einem möglichst vollständigen, prototypischen Abbild der späteren Einsatzumgebung des technischen Systems durchgeführt werden, um somit die Integrationsfähigkeit der auf des *eHighway*-Systems basierenden Fahrzeuge in die Tourenmuster der Transporteure nachzuweisen. Das Demonstrationsprojekt in Schweden trägt durch den begrenzten Versuchsaufbau in der Einsatzumgebung und die Fokussierung auf einen intensiven Testbetrieb wesentliche Merkmale von TRL 6.

---

Tabelle 4-3: Ergebnisse der Förderprojekte ENUBA und ENUBA 2  
(eigene Darstellung nach Siemens AG *et al.* 2016 und Siemens AG 2012).

Themenfeld	ENUBA	ENUBA 2
Laufzeit	05/2010 - 09/2011	05/2012 - 12/2015
<b>Stromabnehmer</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Entwicklung eines zweipoligen, aktiv geregelten Stromabnehmers, auf großem Komponententräger (1,5 m Bautiefe)</li> <li>2 Funktionsmuster für die Integration in Versuchsfahrzeuge</li> <li>1 Labormuster für Funktionstests</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Optimierung und Verkürzung des Stromabnehmers zur Integration in eine Sattelzugmaschine (0,5 m Bautiefe)</li> <li>2 Funktionsmuster für die Integration in unterschiedliche Versuchsfahrzeuge</li> <li>1 Labormuster für externe Labortests</li> </ul>
<b>Fahrzeugtechnik</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>serieller Hybridantrieb mit Ultra-Kondensatoren als Pufferspeicher</li> <li>Umbau durch Siemens in Eigenregie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 Sattelzugmaschine mit parallelem Hybridantrieb und kleiner Traktionsenergiespeicher (in Kooperation mit Scania)</li> <li>1 Sattelzugmaschine mit serielltem Hybridantrieb und großer Traktions-Energiespeichers im Sattelaufleger (Siemens in Eigenregie)</li> </ul>
<b>Infrastruktur</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Versuchsanlage mit 1,2 km nutzbarer Länge ohne Kurve und ohne verkehrstechnische Peripherie (z. B. Rückhaltesysteme, Leitstelle, Schilderbrücke)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Versuchsanlage mit 2,1 km nutzbarer Länge einschließlich Doppel-S-Kurve mit umfangreicher verkehrstechnischer Peripherie (z. B. verschiedene Rückhaltesysteme, integrierte Leitstelle, Wechselverkehrszeichen- und Wegweiserbrücke)</li> </ul>
<b>Umweltwirkung und Wirtschaftlichkeit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>initiale, makroskopische Abschätzungen unter Berücksichtigung vereinfachter Fahrleistungsannahmen</li> <li>Umweltwirkung reduziert auf Analyse der CO<sub>2</sub>-Einsparpotentiale</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wirtschaftlichkeitsbetrachtung aufbauend auf realen Verkehrsaufkommen</li> <li>unabhängig begleitete, vergleichende gesamtsystemische Analyse der stofflichen und nichtstofflichen Umweltwirkungen</li> </ul>
<b>Gesamtsystem</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Systemauslegung und Erprobung mit dem Schwerpunkt Interaktion der Teilsysteme auf der Versuchsanlage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>umfassende Risikoabschätzung des Systems sowie vertiefte technische Bewertung der Integrationsfähigkeit in bauliche und betriebliche Abläufe auf Fernstraßen</li> </ul>

Als nächster Schritt zur Weiterentwicklung des *eHighway* schließt sich nun ein **prototypischer Einsatz in Form eines Feldversuchs** sinnvoll an, welcher dann ein Erreichen von TRL 7 ermöglicht. Aus diesem Grund hat sich das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) entschlossen, Fördermittel für **drei umfangreiche Feldversuche in Deutschland** bereitzustellen (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit 2017c bzw. 2017b und 2018). Im Rahmen dieser Feldversuche sollen insbesondere die **Wechselwirkungen des eHighway-Systems** der weiteren **Systemumwelt** untersucht werden. Zudem sollen Rückschlüsse auf die Systemakzeptanz bei den relevanten **Stakeholder-Gruppen** ermöglicht werden.



Die drei Ladestationen entstehen auf den Bundesautobahnen BAB A5, auf der BAB A1 und auf der Bundesstraße B462. Die drei Teststrecken werden bzw. wurden in Gebieten errichtet, die jeweils einzigartige und besondere Verkehrs- und Streckencharakteristika aufweisen und unterschiedliche Forschungsschwerpunkte besitzen. Nach **Abschluss** der **drei Feldversuche** können dann alle Schritte zum Nachweis der Funktionstüchtigkeit und **Zulassung des Systems (TRL 8)** erbracht sowie die **Markteinführung (TRL 9)** vorbereitet werden. Den Entwicklungsverlauf des *eHighway*-Systems fasst Abbildung 4-5 zusammen.

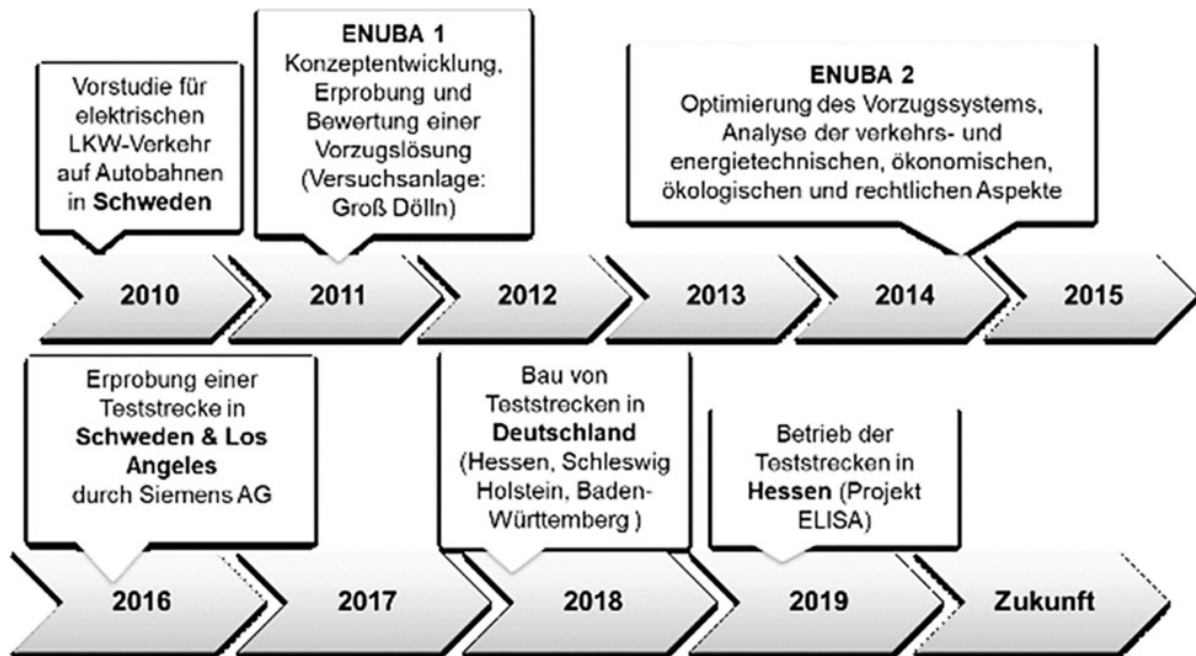


Abbildung 4-5: Entwicklungsverlauf des eHighway-Systems  
(Quelle: eigene Darstellung).



## 4.3.2. Dynamic Charging System

### 4.3.2.1. Übersicht

Der japanische Automobilhersteller Honda hat ein System zur Energieversorgung von Fahrzeugen vorgestellt, das zur Energiezufuhr auf eine seitlich des Fahrstreifens angeordnete Stromschiene sowie einen im Fahrzeug installierten, klappbaren Stromabnehmer zur induktiven Energieübertragung zurückgreift (Tajima *et al.* 2015). Den prinzipiellen Systemaufbau des sog. **Dynamic Charging System** stellt Abbildung 4-6 dar. Eine Besonderheit des Systems ist, dass nach Aussagen von Honda eine Höchstgeschwindigkeit während des Ladevorgangs von ca. 130 km/h möglich sein soll und ein für Honda wichtiges Entwicklungsziel darstellt (Tajima 2018).

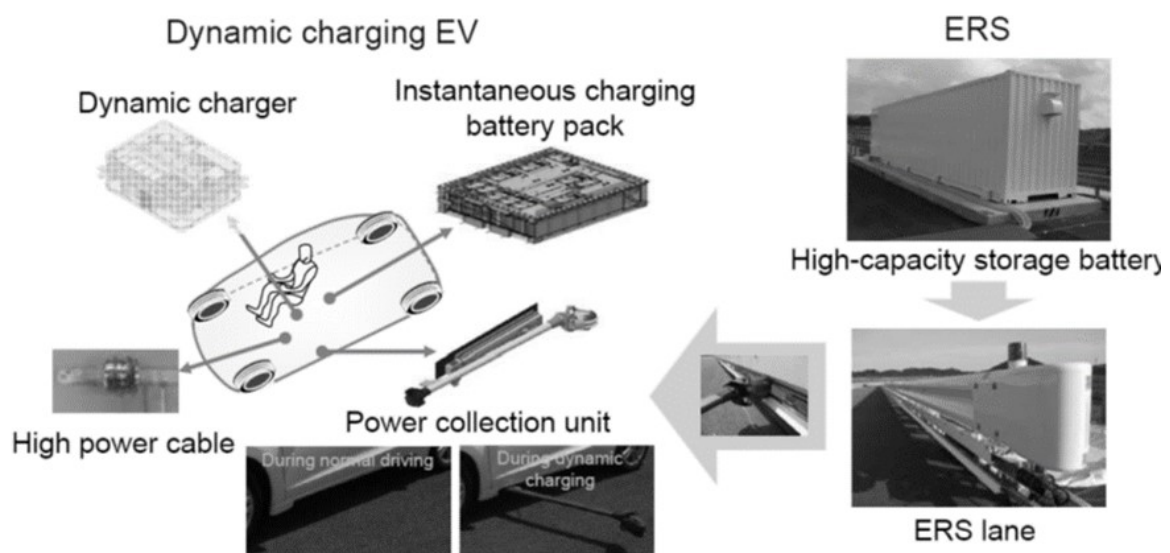


Abbildung 4-6: Aufbau des Honda-Systems  
(Quelle: Tajima 2018).

### 4.3.2.2. Technischer Systemaufbau

Beim *Dynamic Charging System* muss ein ausklappbarer, seitlich am Fahrzeug angebrachter Stromabnehmer mit einer zweipoligen, U-förmigen Stromschiene in Kontakt gebracht werden, die in der passiven Schutzeinrichtung entlang der Fahrbahn installiert ist (siehe Abbildung 4-7 auf der folgenden Seite). Die wichtigsten **fahrzeugseitigen Elemente** des *Dynamic Charging Systems* sind daher der **Stromabnehmer**, der **Wechselrichter**, der **Energiespeicher**, ein **Schnelllader** (sog. *dynamic charger*) sowie der **Antriebsstrang**.

Der Stromabnehmer selbst ist mit zwei konischen Schleifköpfen (sog. *twin-rollers*), die wegen dieser Form bei der Selbstausrichtung des Stromabnehmers an der Schleifleiste Vorteile gegenüber starren Stromabnehmern haben (Tajima 2018). Das System besitzt derzeit noch keine Funktionalität zur automatisierten vertikalen Höhenanpassung des Stromabnehmers (Lambert 2017). Dies ist insbesondere für den Schwerverkehr von Bedeutung, da die vertikale Position des Stromabnehmers sich im voll beladenen und leeren Zustand deutlich unterscheiden kann. Zudem können Nick- und Wankbewegungen des Fahrzeugs während der Fahrt so nur schwer ausgeglichen werden.

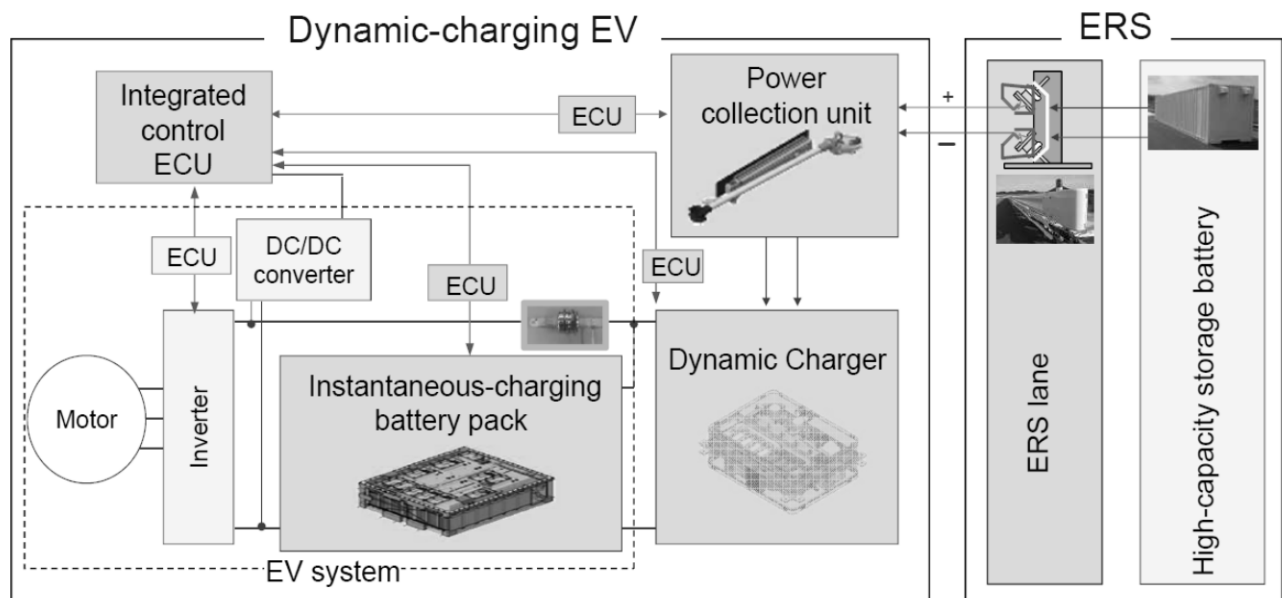


Abbildung 4-7: Elemente des Honda-Systems  
(Quelle: Tajima, 2018).

Bei den **infrastrukturseitigen Elementen** des *Dynamic Charging Systems* handelt es sich einerseits um die in den **passiven Schutzeinrichtungen** bzw. im Fahrbahnbegrenzer eingelassene **Stromschiene**. Andererseits gehört ein Energiespeicher mit sehr hoher Kapazität zum System, die als **Energiequelle** fungiert und in standardisierten 40 Fuß-Container untergebracht ist. Für die Zukunft plant Honda, Photovoltaik zur Energiegewinnung einzusetzen und den so erzeugten Strom zur Versorgung des Systems einzusetzen. Dafür sieht Honda vor, entsprechend nachfragegerecht dimensionierte Solarkraftwerke entlang einer Ladestation errichten. Daher werden dann auch Unterwerke statt der Energiespeicher erforderlich werden. Insgesamt sollen aber durch dieses Vorgehen die Kosten für das Gesamtsystem sinken, da die jeweils entstehenden Stationen mehrerer Kilometer Länge autark und wartungsarm arbeiten sollen (Tajima 2018). Somit nimmt das System aus bautechnisch-planerischer Sicht relativ wenig Raum ein, da es (zumeist) vorhandene Flächen und Teile des Zubehörs der Autobahnen nutzt. Lediglich ein Standort für den Energiespeicher -Container muss abseits der Fahrbahn vorgehalten werden.

#### 4.3.2.3. Entwicklungsstand

Das *Dynamic Charging System*, das zunächst nur zur Benutzung durch Pkw ausgelegt war, wurde im Jahre **2015** im Rahmen eines Vortrages auf einer Konferenz für Automobiltechnik erstmalig vorgestellt (Tajima *et al.* 2015). In diesem Vortrag wurden das **technische Systemkonzept** und erste **Prototypen** beschrieben, die mit einer vergleichsweise hohen Ladeleistung von 450 kW arbeiten sollen. Zudem werden erste Kostenschätzungen präsentiert, die für das *Dynamic Charging System* von Bau- und Betriebskosten von ca. 5% der Kosten eines induktiven Vergleichssystems ausgehen.<sup>28</sup> Daneben wird

<sup>28</sup> Wahrscheinlich handelt es sich bei diesem Referenzsystem um das im weiteren Verlauf vorgestellte OLEV-System aus Südkorea, es konnten hierzu aber keine weiteren Informationen gefunden werden.

---

ausgeführt, dass zur Gewährleistung einer Fahrt im elektrischen Modus ein Verhältnis von Fahrtstrecke zu Ladestrecke von 25:1 angestrebt werden sollte.

In einer zweiten Veröffentlichung aus dem Jahr **2017** werden dann die Ergebnisse erster **Erprobungen des Systems** auf einem **Werksgelände** von Honda vorgestellt (Tajima *et al.* 2018). In diesen Erprobungen wurde erfolgreich mit einer Ladeleistung von 180 kW gearbeitet (600 V Gleichstrom, 300 A), die dem Fahrzeug bei einer Fahrtgeschwindigkeit von ca. 160 km/h zugeführt worden sind. Daneben wurde in dieser Veröffentlichung angekündigt, perspektivisch mit einer Ladeleistung von 450 kW bei einer Fahrtgeschwindigkeit von ca. 200 km/h arbeiten zu wollen (750 V Gleichstrom bei 600 A). Die **Standard-Länge** einer **Ladestation** wurde bei ca. **2 Kilometern** festgelegt und die Kostenschätzungen als weiterhin valide bestätigt.

Schließlich wurden in einer weiteren Veröffentlichung im Jahr **2018** erstmals die Ergebnisse von **Erprobungen** bzw. einer **Simulationsstudie** vorgestellt, die auch einen **Lastkraftwagen** berücksichtigten (Tajima 2018). Der Referenz-Lkw hatte ein **Gesamtgewicht** von **25 Tonnen**, es wurde eine **Energiespeicherkapazität** von **90-100 kWh** unterstellt. Für eine angenommene Gesamtfahrtstrecke von 53 km wurden zur Ladung aus dem Leerzustand ca. 16 km benötigt. Für die gesamte Fahrtstrecke wurde ein Durchschnittsverbrauch von ca. 115 kW bei einer mit bei 80 km/h errechnet.

Wegen der räumlich abgegrenzten Einsatzumgebung (Laboraufbau auf Werksgelände) auf der einen Seite und dem geringen Entwicklungsstand hinsichtlich der Lastkraftwagen auf der anderen Seite hat das Dynamic Charging System insgesamt einen **Technologiereifegrad von TRL 4** erreicht (Versuchsaufbau im Labor). Hier wurde bisher auch noch keine realistische Einsatzumgebung geschaffen (mehrere Fahrstreifen etc.), sodass TRL 5 noch nicht erreicht ist. Insgesamt scheint das *Dynamic Charging System* nur für Planungsräume ohne Seitenstreifen geeignet zu sein. Durch die Gestaltung der meisten Regelquerschnitte einer Autobahn mit Seitenstreifen erweist sich das System hier also als wenig praktikabel (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2008).

---

### 4.3.3. Elonroad

#### 4.3.3.1. Übersicht

Das konduktive System *Elonroad* wurde im Jahr **2013** im Rahmen einer universitären Unternehmens-Ausgründung gleichen Namens an der Lund University in Lund (Schweden) entwickelt (Bateman *et al.* 2018, S. 167). *Elonroad* nutzt als straßenseitiges Element im Wesentlichen eine **Stromschiene**, die **auf der Fahrbahn** angebracht wird und nicht in die Deckschicht eingelassen werden muss. Im Gegensatz zu anderen Systemen, die eine in die Fahrbahn eingebrachte Stromschiene nutzt, muss so die **Stromschiene nicht von Wasser, Schnee und Schmutz** freigehalten werden, um ihren Zweck erfüllen zu können (o. A. 2019b). Zudem kann das *Elonroad*-System jederzeit nachgerüstet werden und muss nicht während des Baus oder bei einer Erneuerung der Fahrbahn-Deckschicht dort installiert werden, wie dies z.B. beim *Elways*-System erforderlich ist.

Das Fahrzeug im *Elonroad*-System ist mit einer klappbaren **Schleifleiste** ausgestattet, die **unterhalb des Fahrzeugs** angebracht wird. Die Stromschiene selbst wird nur dann unter Spannung gesetzt, wenn ein überfahrendes Fahrzeug erkannt wird. Somit ist das *Elonroad*-System auch für **alle Arten von Fahrzeugen** geeignet.

#### 4.3.3.2. Technischer Systemaufbau

Als **straßenseitige Elemente** nutzt das *Elonroad*-System im Wesentlichen die bereits erwähnte **Stromschiene**, **Unterwerke** sowie **Zuleitungen** aus dem lokalen Mittelspannungsnetz. Die Stromschiene wird über eine kraftschlüssige Verbindung (Spezialkleber) auf die Deckschicht der Fahrbahn aufgebracht, sie muss nicht verschraubt werden (o. A. 2019). Die Stromschiene ist ca. 40 cm breit und etwa 5 cm hoch und kann somit von allen regulär zugelassenen Fahrzeugen genutzt werden. Die Stromschiene ist wasserdicht und witterungsbeständig, sie kann durch ein integriertes Heizsystem eis- und schneefrei gehalten werden. Zudem existiert zur Räumung größerer Schneemassen ein eigens konstruierter Räumflug. Abbildung 4-8 vermittelt einen Eindruck des grundsätzlichen **Systemaufbaus**.

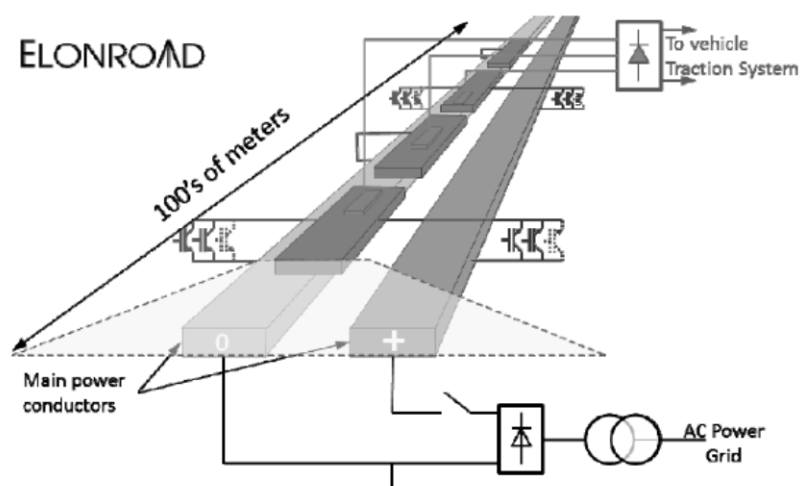


Abbildung 4-8: Aufbau des Elonroad-Systems  
(Quelle: Alakula und Marquez-Fernandez 2017).

---

---

Die **Stromschiene** selbst setzt sich aus **Segmenten** von ca. **einem Meter Länge** zusammen, die von einer Isolationsschicht getrennt werden. Bei **Detektion** eines überfahrenden **Fahrzeuges** werden die **Segmente** so **aktiviert**, dass je ein Segment als negativer bzw. positiver Pol fungiert (Stoica und Nybom 2017). Daher besitzt der ca. 150 cm lange **Stromabnehmer** als wichtigste **fahrzeugseitige Komponente** auch **drei Schleifleisten** (Plus-, Minuspol, Erdung). Der Stromabnehmer im Fahrzeug ist in Abbildung 4-9 dargestellt. Das Patent für den Stromabnehmer ist durch Automobilhersteller frei nutzbar um dadurch die Akzeptanz und die Verbreitung des Systems zu fördern (o. A. 2019b). Zusätzlich muss ein *Elonroad*-Fahrzeug mit einem Bipolartransistor mit isolierter Gate-Elektrode (IGBT) und einem Energiespeicher ausgestattet sein.

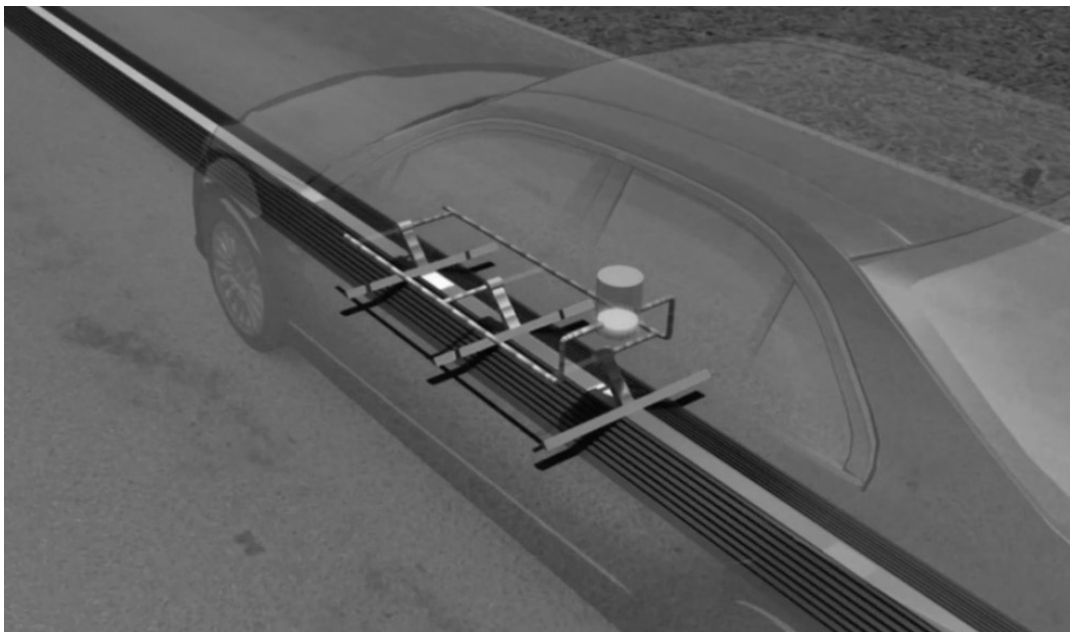


Abbildung 4-9: Stromabnehmer im Elonroad-System  
(Quelle: o. A., 2019b).

Bei einer **Überfahrt** fließt der **Strom** nur für eine **kurze Zeit**, was das System insgesamt **sicher** macht und Personenschäden sehr unwahrscheinlich macht (Alakula und Marquez-Fernandez 2017). Im Rahmen der laborhaften Erprobung wird das System mit **48 V DC** betrieben, soll aber künftig als 650 V bis 750 V DC-System in der Lage sein, **240 kW Ladeleistung** bei einem Wirkungsgrad von 98% abzugeben. Die Länge eines Segments ist dabei theoretisch unbegrenzt, **je 1000 Metern Streckenlänge** wird jedoch ein **Unterwerk** benötigt (Alakula und Marquez-Fernandez 2017).

#### 4.3.3.3. Entwicklungsstand

Die **Entwicklung** des *Elonroad*-Systems begann im Jahr **2013** mit einer ersten **Konzeptstudie**, in deren Rahmen der grundlegende Systemaufbau beschrieben und ein Funktionsmuster entwickelt wurde (o. A. 2019b). Aufbauend auf dieser Konzeptstudie konnten im Jahr **2016** Fördermittel zum Entwurf und zum Bau eines ersten **Demonstrators** auf dem Gelände der Lund University eingeworben werden. Aufbauend auf den dort gesammelten Erkenntnissen wurde in Örtöfta nahe Lund im Jahr **2017** eine **Teststrecke**



---

von ca. 150 Metern Länge auf einem **abgeschlossenen Betriebsgelände** errichtet. Zudem wurde ein Modul des Systems entwickelt, das das Laden von Fahrzeugen in stationärem Zustand erlaubt (Zettraeus 2018). Abbildung 4-10 zeigt einen Ausschnitt der Teststrecke in Örtöfta.



Abbildung 4-10: Elonroad-Teststrecke  
(Quelle: o. A., 2019b).

In diesem Zusammenhang wurde auch geplant, den **Busverkehr** in Lund bzw. Mariästad komplett elektrisch abzuwickeln und dazu das *Elonroad*-System einzusetzen, wozu bereits eine umfassende **Simulationsstudie** im Rahmen einer Dissertation erstellt wurde (Lindgren 2015). Ein entsprechendes Projekt hätte im Sommer 2017 beginnen sollen, der aktuelle Status konnte bei Abschluss dieser Arbeit mangels entsprechender Quellen aber nicht ermittelt werden. Die **Kosten zur Errichtung des Systems** werden derzeit mit ca. 0,6 bis 1,5 Mio. Euro pro Fahrstreifen und Kilometer angegeben (Connolly 2016). Die **Herstellkosten** eines *Elonroad-Stromabnehmers* werden auf ca. 5.000 Euro je Stück geschätzt und liegen damit deutlich unter den Herstellkosten eines *eHighway*-Pantographen.

Hinsichtlich des vorliegenden **Technologie-Reifegrades** kann festgehalten werden, dass bei Fertigstellung dieser Arbeit noch **kein Feldversuch** in der Einsatzumgebung des *Elonroad*-Systems stattgefunden hat, lediglich eine kurze Teststrecke existiert auf einem abgeschlossenen Betriebsgelände, weswegen insgesamt von einem Laboraufbau ausgegangen werden kann. Zudem ist die **technische Entwicklung** des Systems selbst **noch nicht abgeschlossen**, die gewünschte Leistungsabgabe von 240 kW konnte bspw. bisher noch nicht realisiert werden. Daher ist für das *Elonroad*-System ein **Reifegrad von TRL 4** zu konstatieren.

---

---

## 4.4. Induktive Systeme

*In diesem Abschnitt wird das induktive Energieversorgungssystem OLEV vorgestellt. Dabei wird, wie auch im vorangegangenen Abschnitt, der zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit erreichte technische Reifegrad aufgezeigt, indem der technische Entwicklungsprozess nachvollzogen wird. Zudem wird der technische Systemaufbau dargestellt.*

### 4.4.1. OLEV

#### 4.4.1.1. Übersicht

Als Vertreter der induktiven Energieübertragungssysteme besitzt **OLEV** (Akronym für **OnLine Electric Vehicle**) einerseits eine **Primäreinheit**, die in die **Fahrbahn** eingelassen werden muss (Suh und Cong 2017a). Andererseits wird **fahrzeugseitig** eine **Sekundärspule** zur Aufnahme der Energie benötigt. Das System wurde vom Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) entwickelt und im Jahr **2010** erstmals der Öffentlichkeit präsentiert (Dillow 2010). Trotz des relativ weit fortgeschrittenen Entwicklungsstandes des **OLEV**-Systems ist es in Europa bisher kaum bekannt.

Eine **Spannung** wird nur dann an der Primärspule **induziert**, wenn ein **überfahrendes Fahrzeug erkannt** wird. Das Prinzip ähnelt dem einer Induktionsschleife, einer Technologie, die im Verkehrsmanagement zur Verkehrsdatenerfassung weit verbreitet ist (Bundesanstalt für Straßenwesen, 2012). Im Unterschied zur Induktionsschleife wird jedoch **zwischen mit OLEV-Elementen ausgestatteten** Fahrzeugen und solchen, die **keine OLEV-Elemente** besitzen, **unterschieden**. Hierdurch soll die Exposition gegenüber den elektromagnetischen Feldern möglichst geringgehalten werden (Ahn, 2017).

#### 4.4.1.2. Technischer Systemaufbau

Die **Primärspule** als wichtigstes **straßenseitiges Element** des **OLEV**-Systems besteht aus **W-förmigen Ferritkern-Strängen**, die ca. 30 cm unter die Fahrbahnoberkante eingelassen werden können (Suh und Cong 2017b, siehe auch Abbildung 4-12). Somit eignet sich das System **nicht** zur einfachen **Nachrüstung** (z.B. im Vergleich zur *Elonroad*), es müssen jedoch pro Fahrstreifen nur zwischen 5 - 15% der Fahrbahndeckschicht in der Breite abgetragen und danach erneuert werden. Den prinzipiellen **Systemaufbau von OLEV** verdeutlicht Abbildung 4-11 auf der folgenden Seite.

Über die Ferritkern-Stränge werden beidseitig Stromkabel geführt, es entsteht eine Primärspule, die die Ladeleistung des Systems aufgrund der entstehenden, überlappenden Magnetfelder erhöht (Ahn 2017a).<sup>29</sup> Zudem müssen die Zuleitung und ein Datenkabel verlegt werden. Zur Energieeinspeisung benötigt das **OLEV**-System lediglich einen **Anschluss an das Niederspannungsnetz**, im Falle von Südkorea sind dies 380 V bzw. 440 V (Jung 2017a). Ein Spannungswandler als **Unterwerk** transformiert die Spannung und erzeugt durch Einspeisung des Stroms ein Magnetfeld von 20 kHz AC. Einen Ausschnitt eines Fahrbahn-Querschnitts mit **OLEV**-System zeigt Abbildung 4-12 auf der nächsten Seite.

---

<sup>29</sup> Die verwendete Ladetechnologie namens SMFIR (Shaped Magnetic Field In Resonance) ist patentiert und eignet sich z.B. für U-Bahnen, Hochgeschwindigkeitszüge, Trams oder weitere Anwendungen (KAIST o.J.).



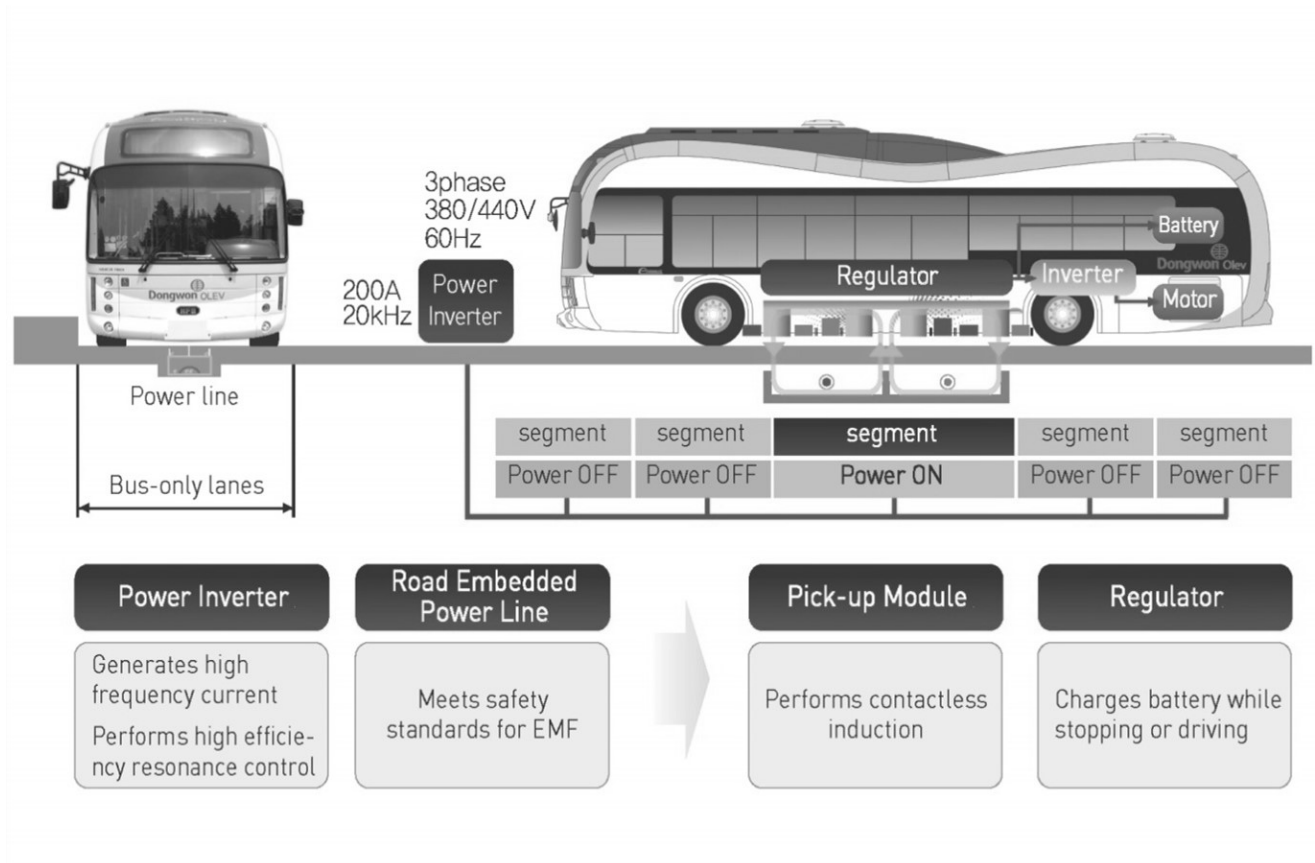


Abbildung 4-11: Systemaufbau OLEV  
(Quelle: Alonso *et al.* 2016)

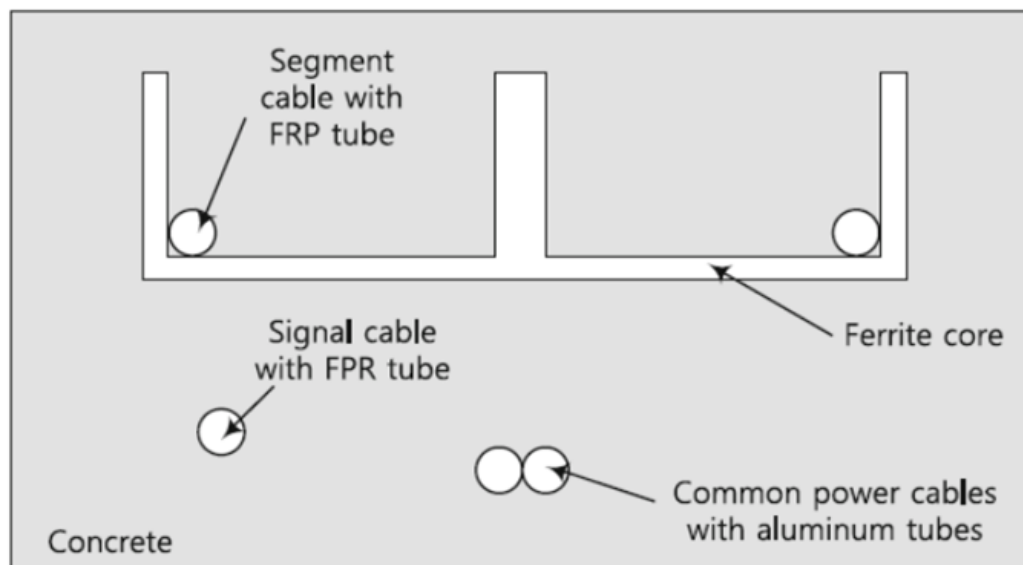


Abbildung 4-12: Fahrbahn-Querschnitt des OLEV-Systems  
(Quelle: Jung 2017a, S. 11).

Bezüglich der **elektromagnetischen Verträglichkeit** des Systems können gültige internationale Standards erfüllt werden, die eine Gefährdung für Mensch und Umwelt praktisch ausschließen (Anh 2017). Insgesamt müssen vergleichsweise **wenige straßenseitige Systemelemente** installiert werden, dies ist jedoch wegen der notwendigen Erneuerung der Deckschicht aufwändiger als z.B. beim *Elonroad*-System. Durch eine Kombination dieser Arbeiten mit den ohnehin regelmäßig stattfindenden Fahrbahnerneuerungen lässt sich jedoch dieser Mehraufwand minimieren.

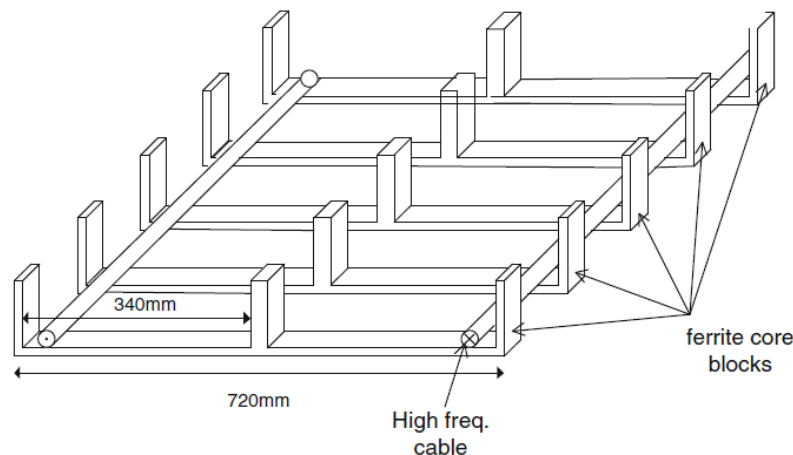


Abbildung 4-13: Ferritkern-Struktur des OLEV-Systems  
(Quelle: Jung 2017a, S. 160).

Zu den wichtigsten **fahrzeugseitigen Elementen** des OLEV-Systems zählen die **Sekundäreinheiten** und der **Energiespeicher**. Ein OLEV-Fahrzeug kann mit mehreren Sekundäreinheiten (sog. *pick-up units*) ausgestattet sein, die ebenfalls aus W-förmigen Ferritkerngestängen bestehen (Yoon 2017). Jede **Sekundäreinheit** ist in der Lage, eine **Ladeleistung von 17 kW** aus der induzierten Spannung aufzunehmen. Diese Eigenschaft kommt insbesondere langen Fahrzeugen wie Bussen und schweren Nutzfahrzeuge zu Gute, da sich die Ladeleistung durch das Ausnutzen der gesamten Fahrzeuglänge mit Sekundäreinheitenerhöht. Die aufgenommene Energie wird über ein Steuergerät (sog. *regulator*) entweder direkt an die Antriebseinheit oder zur Ladung des Energiespeichers weitergeben (Jung 2017b). Der im Fahrzeug verbaute **Energiespeicher** kann im OLEV-System, wie bei allen anderen Systemen auch, kleiner ausfallen als bei rein stationär-elektrischen Fahrzeugen und wird anwendungsfallspezifisch dimensioniert.

#### 4.4.1.3. Entwicklungsstand

Das OLEV-System wurde in insgesamt **drei Forschungsprojekten** zwischen **2009 und 2013** derart weiterentwickelt, dass es bei einem Abstand von 20 cm zwischen Primär- und Sekundärspule bei einem Wirkungsgrad von 85% konstant eine Leistung von 180 kW übertragen kann (Ahn 2017b). Hierzu wurden fünf unterschiedliche Versionen des Systems entwickelt und erprobt (Bateman *et al.* 2018, S. 104). Für kommerzielle Anwendungen des Systems abseits der wissenschaftlichen Forschung ist das Unternehmen *Dongwon OLEV Inc.* aus Südkorea verantwortlich.

---

Der erste **OLEV-Demonstrator** wurde bereits im Jahr **2010** auf dem **Gelände eines Freizeitparks** in Seoul (Südkorea) errichtet und diente dazu, den Energiespeicher eines elektrischen Shuttlebusses auf vier jeweils 100 Meter langen Abschnitten wieder zu laden. Der Demonstrator konnte bereits mit einem Wirkungsgrad von ca. 70% arbeiten. Im gleichen Freizeitpark wurde auch eine Tram mit den **OLEV-Elementen** ausgestattet und so ein neues Anwendungsfeld für das System erschlossen (KAIST o.J.).

Die **ersten Feldversuche** für das **OLEV-System** in der realen Systemumgebung (hier im Busverkehr des ÖPNV) begannen im Jahr **2012** und wurden sukzessive fortgeführt (Suh und Cong 2017a). Innerhalb Südkoreas wurden bisher fünf verschiedene Strecken für Feldversuche des Systems im Straßenverkehr in Betrieb genommen (Ahn 2017b). Einer dieser Feldversuche umfasste zunächst zwei mit **OLEV-Elementen** ausgestattete Busse, die auf einer innerstädtischen Linie in der südkoreanischen Stadt Gumi in 10 täglichen Kursen je etwa 24 Kilometer je Kurs zurücklegen. Die Busse werden dort mit 20 kHz und 100 kW geladen, der Abstand zwischen Primär- und Sekundärspule konnte auf 17 cm verringert werden (Barry 2013). Im Jahr 2016 wurde die Anzahl der Busse auf vier erhöht sowie die mit Primäreinheiten ausgestattete Strecke auf ca. 150 Meter verlängert (KAIST o.J.). Daneben wurde im Jahr 2015 in der südkoreanischen Stadt Sejong im Rahmen einer städteplanerischen Umgestaltung der Innenstadt eine komplette Buslinie mit **OLEV-Elementen** auf Elektroverkehr umgestellt. Beide Feldversuche nutzen allerdings spezielle Fahrstreifen, die nur durch Busse verwendet werden dürfen, in der Regel findet also kein Mischverkehr statt (*cum grano salis* bei Zuwiderhandlungen).

Bezüglich der **Kosten für den Bau der straßenseitigen Elemente** des **OLEV-Systems** konnte auf Basis der bisher durchgeführten Feldversuche ein Wert von 0,42 Mio. EUR pro Fahrstreifen-Kilometer ermittelt werden, das System kann derzeit 180 kW übertragen (Park und Yong 2017, S. 338).<sup>30</sup> Weil das System schon in mehreren Anwendungen in der realen Einsatzumgebung getestet wurde, sollte ihm ein **Technologiereifegrad von mindestens TRL 7** zuerkannt werden. Ob eine Typenzulassung vorliegt, kann derzeit nicht beurteilt werden, weswegen TRL 8 auch in Frage käme, allerdings nicht bestätigt werden kann.

---

<sup>30</sup> In der zitierten Studie wird mit 0,5 Mio. USD je Kilometer und Fahrstreifen gerechnet. Dies entspricht umgerechnet mit dem durchschnittlichen Wechselkurs des Jahres 2018 in etwa 0,42 Mio. Euro pro Fahrstreifen und Kilometer (Quelle Wechselkurs: EZB (2019): Devisenkursstatistik. Stand vom 13.02.2019).

---

#### 4.5. Zwischenfazit

Eine Vielzahl unterschiedlicher Systeme zur Energieversorgung des Elektroverkehrs während der Fahrt konnte im Rahmen der Literaturanalyse identifiziert werden. Diese **Systeme** weisen teilweise recht deutliche **Unterschiede** in ihrem erreichten **Technologiereifegrad**. Während einige Systeme bereits im Stadium von Feldversuchen sind, um dadurch eine wichtige Hürde in Richtung der endgültigen Marktreife der Systeme zu nehmen, ist die Entwicklung anderer Systeme bisher nicht über den Konzeptstatus oder den Aufbau von Laborversuchen hinausgekommen. So sind *OLEV* und *eHighway* mit jeweils TRL 7 in Bezug auf deren Reifegrad am weitesten entwickelt. Einen Überblick über wichtige Eigenschaften der Systeme gibt Tabelle 4-4.

Tabelle 4-4: Zusammenfassung wichtiger Systemparameter  
(Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Kapitel 3).

Name	Baukosten	Betriebskosten	Ladeleistung	TRL <sup>31</sup>	Max. Unterwerksabstand	Fahrzeugarten
Einheit	Mio. EUR/ (Fahrstreifen und km)	% der Baukosten	(kW)	(-)	(m)	(-)
OLEV	0,42	k.A.	180	TRL 7	k.A.	alle
eHighway	0,85 bis 1,55	2,5	200	TRL 7	3.000	nur Lkw
Dynamic Charging System	k.A.	k.A.	130	TRL 4	2.000	alle
Elonroad	0,6 bis 1,5	1,0 -2,0	180 – 360	TRL 4	k.A.	alle

Die **Zuordnung** der vorgestellten **Systeme zur Energieversorgung** des Elektroverkehrs während der Fahrt zu einer der TRL-Stufen erfolgte **verbal-argumentativ auf Basis** eines Vergleichs des publizierten Entwicklungsstandes mit den Definitionen der einzelnen TRL. Weil insbesondere bei Veröffentlichungen von Unternehmen nicht eindeutig beurteilt werden kann, ob sich der tatsächliche und der publizierte Entwicklungsstand eines technischen Systems aus vertrieblisch-unternehmenspolitischen Gründen decken, wurde im Zweifel die niedrigere TRL-Stufe gewählt.

Die Systeme weisen auch wesentliche **Unterschiede** in Bezug auf einige wichtige **Systemeigenschaften** auf. Alle Systeme mit Ausnahme des *eHighway* können so zum Beispiel durch alle Fahrzeugarten genutzt werden. Dieses System weist wegen der Notwendigkeit der Errichtung von Masten in einem Abstand von mindestens 50 Metern und damit verbundenen Leitungsbauwerken auch den höchsten **Grad der Flächeninanspruchnahme** aus. Hinsichtlich der **Ladeleistung** kann das *Elonroad*-System derzeit mit 240 kW für die schnellste Ladung sorgen, mit 200 kW folgt der *eHighway* während *OLEV* 180 kW und

<sup>31</sup> Siehe Abschnitt 3.3

---

das *Dynamic Charging System* 130 kW zuführen können. Hinsichtlich der gesamten **Baukosten** kann das *OLEV*-System mit ca. 0,5 Mio. Euro je Fahrstreifen und Kilometer die Position des Spitzenreiters beanspruchen. Für das *Elonroad*-System existiert dagegen eine sehr breite Schätzung von ca. 0,6 Mio. bis 1,5 Mio. Euro je Kilometer und Fahrstreifen, weswegen eine Einordnung derzeit schwierig ist. Das Intervall wird sich allerdings weiter verkleinern, sobald weitere technische Entwicklungen, namentlich Feldversuche, vorgenommen werden. Während es für das *Dynamic Charging System* keine Schätzung für die Baukosten gibt, rangiert der *eHighway*, bedingt durch den Systemaufbau, mit 0,85 bis 1,55 Mio. EUR pro Fahrstreifen und Kilometer am unteren Ende der Rangliste.

Während für das *OLEV*-System die Adaption auf **Lastkraftwagen** noch aussteht, ist das *eHighway*-System hingegen besonders für diese Art von Fahrzeugen geeignet. Zudem existieren für den Planungsraum Deutschland einige Arbeiten, die sich mit der Gestaltung von Ausbau-Netzen befassen haben. Außerdem ist das *eHighway*-System sehr gut dokumentiert, insbesondere die Kostenschätzungen basieren auch auf der Erfahrung aus der Praxis, bedingt durch die drei Feldversuche in Deutschland. Zudem lässt sich das Vorgehen einer Infrastruktur-Bewertung am *eHighway*-System wegen der hohen Anforderungen an räumliche und bautechnische Eigenschaften der Streckenelemente besonders gut demonstrieren.

Aus diesen Gründen dient der *eHighway* in dieser Arbeit als **Anwendungsbeispiel** für das im Rahmen dieser Arbeit zu entwickelnde simulationsbasierten Optimierungsverfahren zur Ausstattung deutscher Autobahnen mit Systemen zur Energieversorgung von Lastkraftwagen. Dieses Verfahren wird im folgenden Abschnitt beschrieben. Die beispielhafte Anwendung des Verfahrens auf den *eHighway* für deutsche Autobahnen ist dann in Kapitel 6 dokumentiert. Hier wird auch auf Deutschland betreffende Studien zum Netzausbau detaillierter eingegangen.

---

---

## 5. Entwicklung eines simulationsbasierten Optimierungsverfahrens

---

*Ein einleitender Abschnitt widmet sich in diesem Kapitel zunächst einer ausführlicheren verbalen Beschreibung des zugrundeliegenden Planungsproblems. Darauf aufbauend werden in einem zweiten Abschnitt Anforderungen an das zu entwickelnde simulationsbasierte Optimierungsverfahren abgeleitet.*

*Auf dieser Basis wird in einem weiteren Abschnitt ein simulationsbasiertes Optimierungsverfahren vorgestellt und zunächst überblicksartig dessen Ablauf beschrieben, um dann in drei weiteren Abschnitten die verfahrenskonstituierenden Bestandteile detailliert vorzustellen. Ein erster Verfahrensteil widmet sich der Bewertung von Streckenelementen hinsichtlich deren Ausstattungsfähigkeit mit bestimmten Systemen zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt. Ein zweiter Verfahrensteil dient der Generierung einer Relationsstichprobe aus einer Verflechtungsmatrix der Güterverkehrsnachfrage. Schließlich wird in einem dritten Verfahrensteil die räumliche Lage und Ausdehnung von Ladestationen entlang des Straßennetzes ermittelt.*

### 5.1. Beschreibung des zugrundeliegenden verkehrsplanerischen Entscheidungsproblems

Als **verkehrsplanerisches Handlungskonzept** soll die Ausstattung von Straßen mit Systemen zur Energieversorgung von Lastkraftwagen während der Fahrt dazu beitragen, ein *ex ante* durch **politische Entscheidungsträger** definiertes **Ziel zur Reduktion** der direkten, durch den Straßengüterverkehr erzeugten **Kohlenstoffdioxid-Emissionen** zu erreichen. Langfristig sollen damit, im Zusammenwirken mit dem Personenverkehr, die Kohlenstoffdioxid-Emissionen des Verkehrssektors vollständig vermieden werden. Die Erreichung dieses Ziels hängt aber auch stark von weiteren Einflussfaktoren außerhalb des Verkehrssektors ab. Im Verlauf eines Verkehrsplanungsprozesses können zu diesem übergeordneten Ziel noch weitere Zielbereiche und -kriterien hinzukommen.

Der **räumlich differenzierte Streckenausstattungsgrad** mit Systemen zur Energieversorgung des Elektroverkehrs während der Fahrt spielt zur Verringerung der straßengüterverkehrsbedingten Kohlenstoffdioxid-Emissionen eine wichtige Rolle. Als **Streckenausstattungsgrad** wird in diesem Kontext das **Verhältnis der ausgestatteten Streckenkilometer und zur Gesamtlänge des Netzes** verstanden. Vom Streckenausstattungsgrad bzw. der damit verbundenen Ladefähigkeit der Fahrzeuge hängt einerseits die Dimensionierung der fahrzeugseitig vorzusehenden Energiespeicher ab. Je größer der Streckenausstattungsgrad, desto geringer können die Energiespeicher in den Fahrzeugen dimensioniert sein. Andererseits steigt mit dem Streckenausstattungsgrad auch der finanzielle Aufwand, der zur Erreichung des Emissionsminderungsziels nötig wird.<sup>32</sup>

Wird unterstellt, dass zur Erreichung des Emissionsminderungsziels entsprechende finanzielle Mittel nur in begrenztem Umfang zur Verfügung stehen werden, kommt somit einerseits der **Identifikation derjenigen Streckenelemente** eine hohe Bedeutung zu, die nur mit vergleichsweise hohem Aufwand infrastrukturseitig mit Systemelementen zur Energieversorgung ausgestattet werden können. Deren Aussparung bei der Streckenausstattung könnte zur Erschließung von Kostensenkungspotentialen führen und sollte daher bei der Ableitung von Netzkonfigurationen berücksichtigt werden. Andererseits ist die Kenntnis derjenigen **Streckenelemente**, die von einer **hohen Verkehrsnachfrage** gekennzeichnet

---

<sup>32</sup> Siehe hierzu auch Anhang 5

---

sind von großer Bedeutung. Deren Ausstattung mit Systemelementen zur Energieversorgung während der Fahrt leistet dann auch einen hohen Beitrag zum Emissionsminderungsziel. Somit ist neben dem Streckenausstattungsgrad auch eine möglichst sinnvolle Netzkongfiguration auf räumlicher Ebene eine entscheidende Determinante für die Zielerreichung.

Das hier zugrundeliegende Entscheidungsproblem für die Verkehrsplanung liegt also in der **Identifikation und Auswahl derjenigen Streckenelemente** sowie deren Überführung in eine stimmige Netzkongfiguration, die den finanziellen Mittelaufwand minimiert (Zielfunktion) und dabei die vorgegebenen Minderungsziele (Nebenbedingung) erreicht. Somit lässt sich die Fragestellung mit Blick auf die Ausführungen in Abschnitt 3.1.3 als ein **Optimierungsproblem** auffassen. Auf dieses skizzierte **Optimierungsproblem** ergibt sich noch eine weitere **Sichtweise**. Einerseits kann die Frage nach dem minimalen Mitteleinsatz zur Erreichung eines definierten Emissions-Zielwerts gestellt werden. Andererseits kann aber auch untersucht werden, welche Abschnitte des Netztes mit Systemen zur Energieversorgung von Lastkraftwagen ausgestattet werden müssen, um mit einem **gegebenen Budget** (Nebenbedingung) **eine maximale Reduktion** (Zielfunktion) der direkten, güterverkehrsinduzierten Kohlenstoffdioxid-Emissionen zu erreichen.

Diese Sichtweise auf das **Optimierungsproblem** mit einem gegebenem Budget als Nebenbedingung und einer mittels einer Zielfunktion zu maximierender Emissionseinsparung erscheint aus praktischer Sicht wegen der nur begrenzt zur Verfügung stehenden finanziellen Mittel relevanter und soll daher im Anwendungsbeispiel auch Verwendung finden.

Zur Lösung des Problems kommt grundsätzlich eine Reihe möglicher Verfahren in Betracht (siehe auch Abschnitt 3.1.3). Warum sich diese allgemein-generischen Verfahren für das skizzierte verkehrsplanerische Entscheidungsproblem weniger eignen, sondern die **Entwicklung eines neuartigen simulationsbasierten Optimierungsverfahren** notwendig wird, wird im folgenden Abschnitt begründet. Hierzu werden zunächst **anwendungsrelevante Anforderungen** an ein mögliches Lösungsverfahren formuliert, um dann auf dieser Basis die Wahl der Modellierungsmethode zu begründen.

---



---

## 5.2. Auswahl der Modellierungsmethode

Auf Basis der Problembeschreibung in Abschnitt 5.1 lässt sich eine Reihe von **Anforderungen** an das zu entwickelnde **Verfahren zur simulationsbasierten Optimierung** der Ausstattung deutscher Autobahnen mit Systemen zur Energieversorgung von Lastkraftwagen während der Fahrt ableiten. Mit Erfüllung dieser Anforderungen soll eine **größtmögliche Strukturähnlichkeit** der kausalen Wirkungszusammenhänge zwischen **dem realen Problem** und dem modellbasierten Verfahren gewährleistet werden. Mögliche Verfahren zur Lösung des skizzierten Optimierungsproblems sollten diese Anforderungen daher erfüllen.

Diese **Anforderungen** lassen sich unter inhaltlichen Gesichtspunkten den Kategorien **Energiespeicher**, **Infrastrukturbewertung**, **Verkehrsnetzmodell** und **Raumauflösung** zuordnen. Zudem sollten einige technische und anwendungsspezifische Anforderungen im Hinblick auf die Implementierung des Verfahrens in eine Modell-Software erfüllt werden.

### 5.2.1. Anforderungen an ein Lösungsverfahren

#### Berücksichtigung der Energiespeicher

Zwischen dem **Streckenausstattungsgrad** mit Systemkomponenten zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt einerseits und der **Größe des fahrzeugseitigen Energiespeichers** andererseits besteht eine **umgekehrt proportionale Beziehung**: je höher der Streckenausstattungsgrad des Gesamtnetzes desto kleiner können die Energiespeicher der Fahrzeuge dimensioniert werden. Umgekehrt haben große, fahrzeugseitige Energiespeicher zur Folge, dass vergleichsweise wenige Elemente des Straßennetzes mit Ladeinfrastruktur versehen werden müssen. Die **Vernachlässigung** von im Fahrzeug verbauten **Energiespeichern** bei einer Modellbildung wäre daher wohl die restriktivste Vereinfachung der realen Wirkbeziehungen.

Im Hinblick auf eine **modellbasierte Untersuchung** des Planungsproblems sollten daher die fahrzeugseitig verbauten **Energiespeicher Berücksichtigung** finden. Parallel dazu sollte auch das **Wechselspiel aus Ladung und Entladung** des fahrzeugseitig verbauten Energiespeichers in einem Modell berücksichtigt werden. Zudem sollte ein Verfahren auch **verschiedene Energieversorgungssysteme** für Lkw während der Fahrt sowie verschiedenartige Referenzfahrzeuge abbilden können.

Auf diese Weise können Anforderungsprofile an die Fahrzeuge formuliert werden und hierüber **Konfigurationen der Fahrzeuge** abgeleitet werden. Dazu können auf Basis des Wechselspiels von auszustattenden Netzabschnitten einerseits und notwendiger, fahrzeugseitig mitgeführter Energiemenge andererseits bestimmte Szenarien definiert werden. Diese **Szenarien** enthalten dann jeweils eine bestimmte **Fahrzeug- und Ladestationskonfiguration**. Ein Lösungsverfahren sollte aber auch eine variable Dimensionierung der Kapazität der Energiespeicher sowie variable Lade- und Entladeraten berücksichtigen können. Auf Basis von variablen, aber wahrscheinlichen Fahrzeugkonfigurationen können **Mindest-Ausstattungsgrade** des Gesamtnetzes bzw. die zugrundeliegenden Netzwerkkonfigurationen abgeleitet werden. Außerdem kann auch der Versuch einer **Ermittlung eines Gesamtoptimums** unternommen werden, indem durch systematisches Variieren der Parameter jeweils Ausstattungsgrade ermittelt und vor dem Hintergrund einer Zielfunktion bewertet werden.

---

## Berücksichtigung der Infrastrukturbewertung

Einige **Eigenschaften von Streckenelementen** sorgen dafür, dass sie **nicht oder nur vergleichsweise kostenintensiv mit Systemkomponenten** zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt ausgestattet werden können. Mit Blick auf das Beispiel *eHighway* könnten dies z.B. niedrige Brücken sein, die dafür sorgen, dass der Fahrdrat der Oberleitung unzulässigerweise in den Verkehrsraum ragen würde. Als weiteres Beispiel könnte auf bestimmten Streckenabschnitten, die ein höheres Schneefallrisiko aufweisen, aus Gründen der Verkehrssicherheit auf eine Ausstattung mit Komponenten des *Elonroad*-Systems verzichtet werden.

Auf Basis der Ergebnisse dieses, im Folgenden vereinfachend **Infrastrukturbewertung** genannten Vorgangs, können bereits bei der Ableitung verschiedener Netzwerkkonfigurationen nicht **ausstattungsfähige Streckenelemente** berücksichtigt werden. Zudem können Streckenelemente hinsichtlich verschiedener Systeme zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt vergleichend bezüglich ihrer **Ausstattungsfähigkeit** aus **infrastruktureller Sicht** bewertet werden. Zudem können auf Basis der Streckenelemente, die nur mit Mehraufwand ausstattbar sind, **Anpassungen der längenbezogenen Kostensätze** für die Ausstattung einer Teilstrecke vorgenommen werden, die dann im weiteren Planungsprozess bei einer Wirtschaftlichkeitsuntersuchung Anwendung finden können. Die Ergebnisse der Infrastrukturbewertung sind also auch unmittelbar relevant für eine Bewertung auf volkswirtschaftlicher Ebene.

Ein Verfahren zur Lösung des oben skizzierten Problems sollte daher auf eine **Bewertung der Elemente der Straßeninfrastruktur hinsichtlich deren Ausstattungsfähigkeit** mit Systemkomponenten zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt zurückgreifen können. Wünschenswert wäre darüber hinaus auch eine, in einem solchen Verfahren eingebettete Bewertungsmöglichkeit z.B. in Form eines eigenständigen Prozessschrittes.

## Verkehrsnetzmodell

Verkehrsnetzmodelle sind in aller Regel als **Netzwerkgraphen** modelliert, d.h. sie bestehen aus einer Menge an **Knoten** und einer Menge an **Kanten**. Häufig werden auch eigene Kanten für jede Fahrtrichtung sowie bestehende **Abbiegebeziehungen** an Knoten modelliert (Cascetta 2009, S. 45ff). Die einzelnen Kanten des Graphen können von variabler Länge und mit bestimmten Eigenschaften attribuiert (z.B. Regelquerschnitt einer Autobahn) sein. Mit steigender Anzahl an Kanten und Knoten ist in der Regel auch eine höhere Rechenzeit zur Ermittlung einer Umlegung bzw. eines zulässigen Pfades durch das Netzwerk (Routensuche) verbunden.

Bezogen auf das hier vorliegende Problem der Ausstattung bestimmter Kanten mit Ladestationen zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt wäre eine **genaue Ermittlung der räumlichen Lage dieser Ladestationen** auf einzelnen Kanten von Vorteil (im Folgenden wird dieser Vorgang auch als **Lageermittlung** bezeichnet). Bei eher grob aggregierten Verkehrsnetzmodellen, bei denen eine Kante einen Streckenabschnitt einiger hundert Kilometer Länge repräsentiert, wird eine Ladestation in aller Regel keine ganze Kante, sondern nur einen Teil ausfüllen. Bei eher hoch aufgelösten Verkehrsnetzmodellen, bei denen eine Kante wenige Kilometer in der Realität abbildet, umfasst eine Ladestation dann mehrere Kanten sowie ggf. Teile von Kanten. Aus Sicht der **Lageermittlung** wäre eine möglichst **geringe Kantenanzahl** also hinsichtlich der entstehenden Rechenzeiten wünschenswert. Eine

---

---

**Infrastrukturbewertung** könnte hingegen beispielsweise mit einer Kantenauflösung auf Ebene der Betriebskilometrierung von real 100-Metern Länge durchgeführt werden, was für eine Gesamtnetzbetrachtung zu einer **hohen Anzahl an Kanten** führt.

Um diesem Konflikt zwischen den **divergierenden Anforderungen** der Lageermittlung und der Infrastrukturbewertung an die Auflösung des Verkehrsnetzmodells zu begegnen, bietet es sich an, für das zu entwickelnde Lösungsverfahren einen **modularen Aufbau** zu wählen und die verschiedenen Verfahrensteile sequentiell zu durchlaufen bzw. bei gegebener Notwendigkeit auch Iterationsschleifen zwischen zwei oder mehr Verfahrensteilen vorzusehen. Dieses Vorgehen bietet den Vorteil, zwischen den verschiedenen Verfahrensschritten mit einem sequenziell **steigenden Auflösungsgrad** arbeiten zu können. Auf dem niedrigsten Aggregierungsgrad kann so eine fahrtrichtungsbezogene Infrastrukturbewertung ermöglicht werden, um dann auf mesoskopischer Ebene mit erhöhtem Aggregierungsgrad eine Lageermittlung durchführen zu können. Hierdurch können Ladestationen exakt und fahrtrichtungsbezogen auf dem Straßenverkehrsnetz verortet werden bzw. deren Lage ermittelt werden.

### **Verkehrsnachfrage: Grad der Raumauflösung**

Fahrten im Straßengüterverkehr folgen bestimmten räumlichen Mustern, wie in Abschnitt 2.3.2 dargestellt. Statistisch erfasst werden diese Fahrten aggregiert für die entsprechenden statistischen Raumeinheiten des Quell- bzw. Zielgebiets. Bei diesen Fahrten handelt es sich aber eigentlich um ein- oder mehrgliedrige **Punkt-zu-Punkt-Verbindungen**. Üblicherweise wird im Zuge der Modellierung der Verkehrsnachfrage jeder Raumeinheit ein oder mehrere Einspeiseknoten in das Verkehrsnetzmodell zugeordnet, typischerweise das geometrische Zentrum einer Raumeinheit (Lohse und Schnabel 2011). Insbesondere bei sehr hoher Raumauflösung und wenigen Netzeinspeiseknoten entsteht so ein systematischer Modellfehler aufgrund dieser vereinfachenden Annahme, z.B. hinsichtlich der Berechnung von Kenngrößen wie Fahrleistungen oder davon abgeleiteten Größen wie Feinstaub- oder Kohlenstoffdioxidemissionen.

Die, dem zu entwickelnden Verfahren zugrundeliegende **Güterverkehrsnachfrage** sollte also aus dieser Perspektive einen **niedrigen Grad der Raumauflösung** aufweisen. Der niedrige Raumauflösungsgrad bietet den **Vorteil**, dass der Ladezyklus des Energiespeichers eines unterstellten Referenzfahrzeuges wirkungstreu in einem Modell nachgebildet. Darüber hinaus werden die auswertungsrelevanten Kenngrößen, die mit einer Fahrt durch das Verkehrsnetzmodell verbunden sind, besser erfasst. Dieser niedrige Raumauflösungsgrad hat aber den **Nachteil**, dass die Instanzgröße des zugrundeliegenden Optimierungsproblem zunimmt, da vergleichsweise viele Kanten und Knoten verarbeitet werden müssen. Dieses Problem kann bei Zugriff auf entsprechende Rechenkapazitäten zumindest teilweise und in Abhängigkeit der gewählten Methode zur Lösung des Optimierungsproblems abgemildert werden. In Bezug auf das zu entwickelnde Lösungsverfahren ergibt sich also auf Basis dieser Abwägung, dass es möglichst unabhängig von einem konkreten Verkehrsnetzmodells einsetzbar sein sollte, jedoch auf Basis von Relationen arbeiten sollte.

Als **Relation** wird in diesem Kontext eine **gerichtete Beziehung** eines Quell- und eines Zielknotens im Verkehrsnetzmodell verstanden. Einer Relation sind immer ein Verkehrsaufkommen, ein Bezugszeitraum und ein Fahrzeugtyp zugewiesen, sie kann mit weiteren Eigenschaften oder Attributen versehen sein. Einer Relation ist genau ein **Pfad** zugeordnet, d.h. eine zulässige Kantenfolge des

---

jeweiligen Verkehrsnetzmodells vom Quellknoten zum Zielknoten. Durch diese 1:1-Beziehung können alternative Routen zwischen Quell- und Zielknoten sowie verschiedene Umlegungsverfahren verwendet werden.

### Technische Anforderungen für eine Software-Umsetzung

Eine generelle Anforderung an Lösungsverfahren für Optimierungsmodelle, so auch hier, ist es, eine möglichst **gute Lösung** finden zu können. Dies bedeutet in diesem Kontext, dass die gefundene Lösung und das Optimum eine möglichst geringe Abweichung aufweisen sollten. Zudem sollte die gefundene **Lösung in angemessener Zeit** in Relation zur Größe der jeweils zugrundeliegenden Instanz ermittelbar sein.

Daneben wäre es wünschenswert, wenn das anwendungsbereit implementierte Lösungsverfahren derart einstellbar wäre, dass durch variierende Parameterkombinationen **unterschiedliche Systeme zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt** abbildbar wären. Dies erlaubt dann auch das Durchführen von **Sensitivitätsanalysen** hinsichtlich wichtiger Parameter. Zu diesem Zweck bietet es sich auch eine **graphische Benutzeroberfläche** vorzuhalten, mit deren Hilfe dann eine das jeweilige System beschreibende Parameterkombination eingestellt werden kann. Diese Anforderung muss zwar nicht zwingend erfüllt werden, erleichtert aber das Anwenden des Modells und die Auswertung der Modellergebnisse. Zudem könnte das dann anwendungsbereit implementierte Lösungsverfahren als Softwareapplikation für Dritte zur Verfügung gestellt werden, um weiteren Untersuchungen in diesem Bereich den Weg zu ebnen.

Überdies sollte das anwendungsbereit implementierte Lösungsverfahren, zumindest in prototypischer Form, für **verschiedene Planungsräume** einsetzbar sein. Hierdurch wird das Modell von einem konkreten Anwendungsfall abstrahiert und universell einsetzbar, wodurch in Konsequenz unterschiedliche Fragestellungen untersucht werden können. Diese Forderung gilt auch hinsichtlich des **Verkehrsnetzmodell**: die Software sollte prinzipiell, ohne Betrachtung der dazu notwendigen Rechenleistungen, mit Verkehrsnetzmodellen verschiedener Aggregationsgrade umgehen können.

Hinsichtlich der zum Einsatz kommenden Datengrundlage zur **Verkehrsnachfrage** ergeben sich zwei Anforderungen. Zum einen sollte die **Verkehrsnachfrage**, wie auch das **Verkehrsnetzmodell** und der **Planungsraum**, durch den Anwender **frei wählbar** sein. Zum anderen erscheint es sinnvoll, vorbereitende Schritte zur Aufbereitung der Verkehrsnachfrage in einen eigenständigen Verfahrensteil auszulagern. Durch diese Modularisierung können dann in Konsequenz sowohl die Infrastrukturbewertung als auch die Generierung der notwendigen Datengrundlage zur Verkehrsnachfrage anwendungsfallspezifisch und unabhängig von der Lageermittlung, dem eigentlichen Kern des Lösungsverfahrens, durchgeführt werden. Eine Übersicht aller Anforderungen findet sich in Tabelle 5-1 auf der folgenden Seite.

---

Tabelle 5-1: Übersicht der Anforderungen an ein mögliches Lösungsverfahren  
(Quelle: eigene Darstellung)

Energie-speicher	Infrastruktur-bewertung	Verkehrs-netzmodell	Verkehrs-nachfrage	Technische Anforderungen
<ul style="list-style-type: none"> <li>Berücksichtigung des Lade- und Entladezyklus</li> <li>Variable Dimensionierung der Energiespeicher</li> <li>Variable Lade- und Entladeraten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Berücksichtigung infrastruktureller Eigenschaften</li> <li>Bewertung der Eigenschaften für verschiedene Systeme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gerichteter Netzwerkgraph mit Kanteneigenschaften</li> <li>Variabler Auflösungsgrad des Verkehrsnetzmodells</li> <li>Verschiedene Planungsräume integrierbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Relationen auf Ebene von Knotenbeziehungen abbildbar</li> <li>Verschiedene Planungsräume integrierbar</li> <li>Diverse Aggregationsniveaus integrierbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Möglichst gute Lösung in angemessener Zeit</li> <li>Abbildung verschiedener Energieversorgungssysteme</li> <li>Nutzerparametrisierung</li> <li>Sensitivitätsanalysen</li> <li>Graphische Benutzeroberfläche</li> <li>Schnittstelle zu Geodatenbanken</li> </ul>

### 5.2.2. Begründung der Methodenauswahl

Im Kern ist das in Abschnitt 5.1 beschriebene, verkehrsplanerische Entscheidungsproblem ein **Auswahlproblem unter Nebenbedingungen**: aus der Menge aller Streckenelemente eines Straßennetzes sind diejenigen auszuwählen und für eine Ausstattung mit Systemelementen zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt vorzusehen, die modellseitig zum Finden des Optimums einer Zielfunktion unter Einhaltung von bestimmten Nebenbedingungen (wie z.B. der Infrastrukturbewertung) führen.

Mit Blick auf die im obigen Abschnitt formulierten Anforderungen erscheint zur Lösung dieses Entscheidungsproblems ein **mehrstufiges Verfahren** angebracht. Ein wesentlicher Grund dafür ist, dass die verschiedenen Teilprobleme mit unterschiedlichen wissenschaftlichen Methoden gelöst werden können. Für die **Infrastrukturbewertung** eignen sich prinzipiell die in Abschnitt 3.2.3 vorgestellten Bewertungsverfahren. Wie dort bereits herausgestellt wurde, weist die Nutzwertanalyse aber eine Reihe von Vorteilen gegenüber den anderen Verfahren auf. Die **Lageermittlung** erfordert eine Kombination unterschiedlicher Methoden, zum Beispiel die Optimierung und die Simulation. Durch ein sequentiell-mehrstufiges Vorgehen wird es möglich, die Infrastrukturbewertung und die Lageermittlung, die auch verschiedene Auflösungsgrade des zugrundeliegenden Straßenverkehrsnetzmodells benötigen, zu trennen.

In einem **ersten Verfahrensschritt** kann die **Infrastrukturbewertung** auf der höchsten Auflösungsstufe des Verkehrsnetzmodells in einem eigenen Verfahrensteil durchgeführt werden. Aus methodischer Sicht bietet sich hierzu z.B. die **Nutzwertanalyse** an, wie in Abschnitt 5.4.3 noch begründet werden wird. In einem **zweiten Verfahrensschritt** kann nun die **Aufbereitung der notwendigen Datengrundlage zur Verkehrsnachfrage** in Abhängigkeit des konkreten Anwendungsfalls erfolgen. Da in der Regel nur ein Teilausschnitt der gesamten Verkehrsnachfrage relevant ist, wird im Folgenden in Bezug darauf vom **Verfahrensteil Güterverkehrsnachfrage** die Rede sein. Aus methodischer Sicht kommt eine Reihe

---

unterschiedliche Verfahren hier in Betracht, deren Auswahl stark von einem konkreten Anwendungsfall abhängt. Einige Vorschläge aus methodischer Sicht werden in Abschnitt 5.5 gegeben.

Auf Basis der Ergebnisse dieser ersten beiden, vorbereitenden Verfahrensschritte kann schließlich das verkehrsplanerische Entscheidungsproblem in Form des **Verfahrensteils Lageermittlung** in einem **dritten Verfahrensschritt** gelöst werden. Mit Blick auf die formulierten Anforderungen wie z.B. die genaue räumliche Verortung von Ladestationen (auch auf Teilen von Kanten), die Abbildung des Wechselspiels aus **Ladung und Entladung des Energiespeichers** sowie der **verkehrsnachfrage-abhängigen Dimensionierung** der Ladestation eignet sich prinzipiell die Simulation als Methode zur Lösung des Entscheidungsproblems.

Ein Vorgehen, das sich ausschließlich auf das methodische Instrumentarium der Simulation stützt, würde grundsätzlich auch **mögliche Lösungen** für das Entscheidungsproblem generieren. Diese Lösungen müssten dann aber verfahrensextern hinsichtlich ihres Beitrages zur Zielfunktion und der Einhaltung von Nebenbedingungen verglichen werden. Durch eine Kopplung einer Simulationskomponente mit einem Optimierungsmodell, also einer **simulationsbasierten Optimierung**, besteht die Möglichkeit, eine **verfahrensinterne Bewertung verschiedener Simulationsläufe** vorzunehmen und so insgesamt zu einer **möglichst guten Lösung** durch Variation der Simulationsparameter zu gelangen. Aus methodischen Gründen arbeiten simulationsbasierte Optimierungsverfahren mit Heuristiken statt mit exakten Lösungsverfahren, sodass statt nachweislich optimalen Lösungen zumindest gute Lösungen gewährleistet sind.

---



### 5.3. Überblick des Verfahrensablaufs

Auf Basis der Ausführungen in Abschnitt 5.2 wurde ein **mehrstufiges Verfahren** zur Lösung des in Abschnitt 5.1 beschriebenen verkehrsplanerischen **Entscheidungsproblems** entwickelt. Der gesamte Verfahrensablauf ist in Anhang 4 dokumentiert worden. Zur besseren Übersichtlichkeit sind die beiden vorbereitenden **Verfahrensteile Infrastrukturbewertung** und **Güterverkehrsnachfrage** separat in ihrem Grundaufbau in Abbildung 5.1 dargestellt. Zur Darstellung wurde auf die Notationsregeln der **ereignisgesteuerten Prozessketten (EPK)** zurückgegriffen (siehe z.B. Staud 2006, S. 59-245).

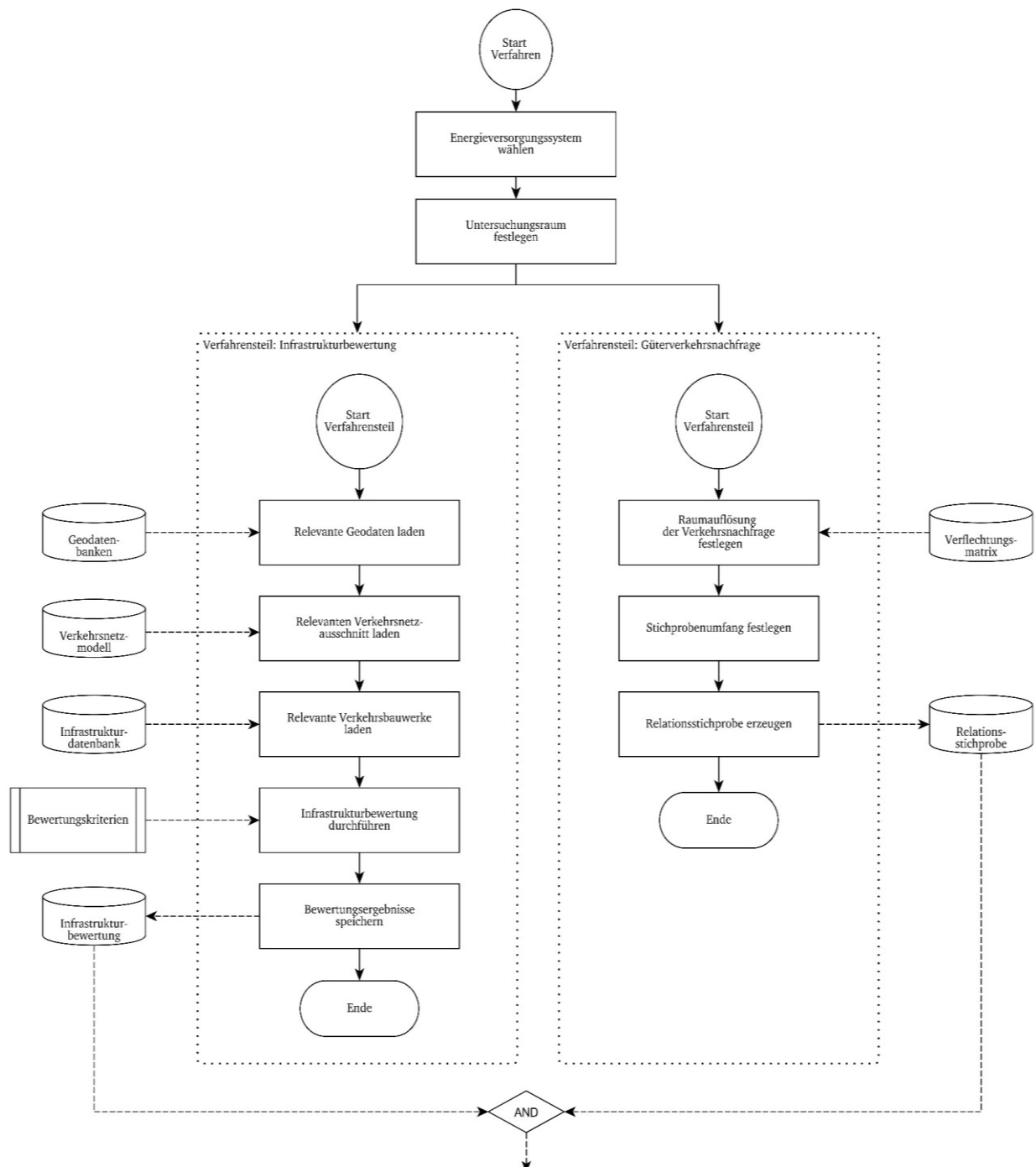


Abbildung 5-1: Überblick der vorbereitenden Verfahrensteile Infrastrukturbewertung und Güterverkehrsnachfrage (Quelle: eigene Darstellung).



Unter Rückgriff auf verschiedene Datenquellen widmet sich ein **erster Verfahrensteil** der Analyse **infrastruktureller Eigenschaften** von Streckenelementen. Auf dieser Basis wird dann die bautechnische Ausstattungsfähigkeit einzelner Streckenelemente unter Bezugnahme auf den jeweils unterstellten Anwendungsfall **bewertet** und die **Ergebnisse** gespeichert. In einem **zweiten Verfahrensteil** wird aus einer Verflechtungsmatrix der Verkehrsnachfrage eine **Relationsstichprobe** generiert, die zusammen mit den Ergebnissen der Infrastrukturbewertung die Eingangs-Datenbasis für einen weiteren Verfahrensteil bildet.

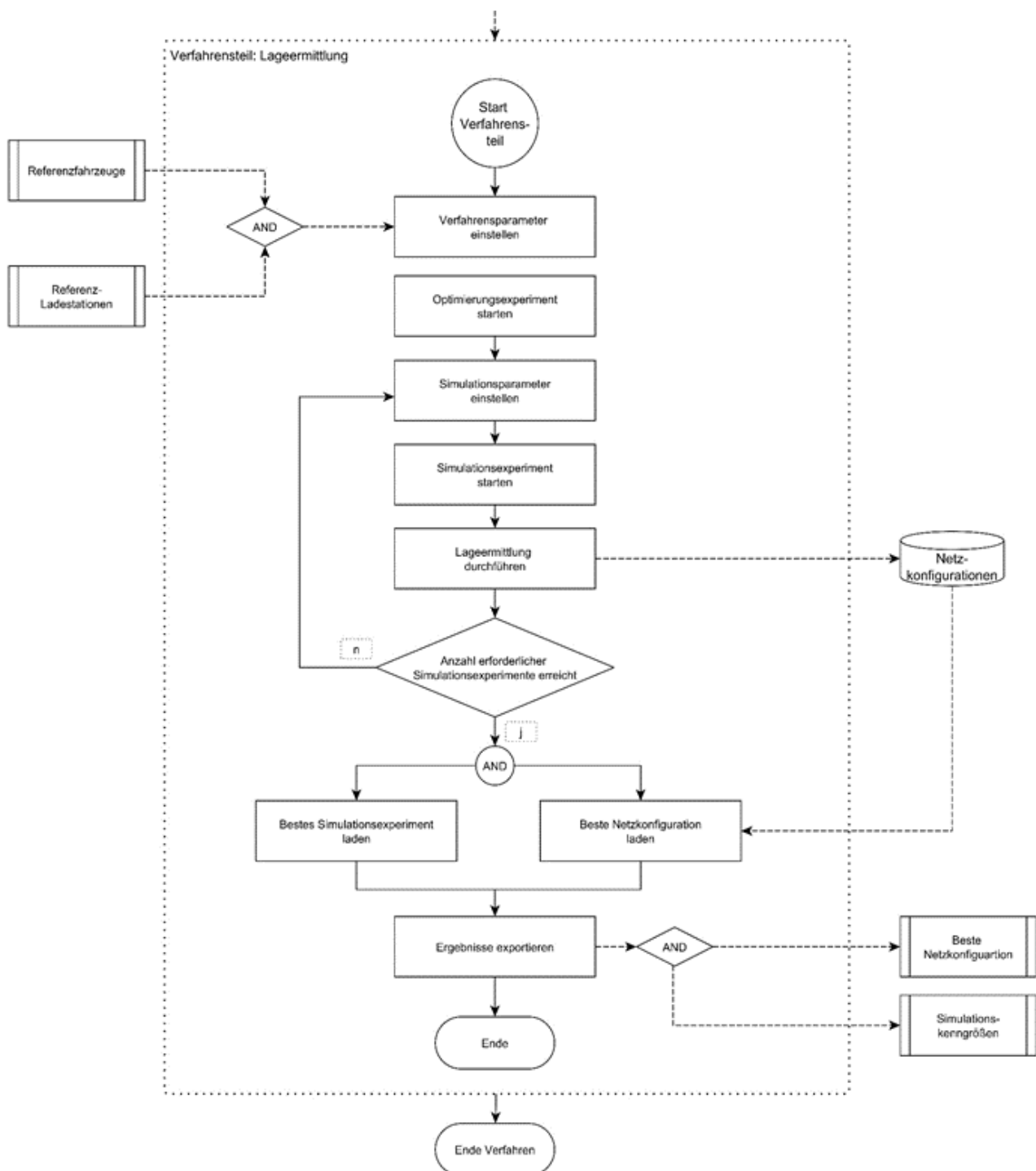


Abbildung 5-2: Überblick des Verfahrensteils Lageermittlung  
(Quelle: eigene Darstellung).

---

Der **dritte Verfahrensteil** mit der Bezeichnung **Lageermittlung** legt auf Basis von Fahrtverläufen mit den jeweiligen Referenzfahrzeugen entlang des unterstellten Verkehrsnetzmodells die **Lage und Länge von Ladestationen** des unterstellten Systems zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt fest. Eine **Übersicht** dieses Verfahrensteils liefert Abbildung 5-2.

Als Kern des **Verfahrensteils Lageermittlung** wird ein simulationsbasiertes Optimierungsmodell vorgeschlagen. Innerhalb der **Simulationskomponente** dieses Modells wird auf Grundlage der vorab festgelegten Relationsstichprobe die **Bewegung von Referenzfahrzeugen** durch das Straßenverkehrsnetzmodell als Kantenabfolgen nachempfunden. Während der virtuellen Fahrt des Referenzfahrzeuges wird einerseits der Entladevorgang der verbauten Energiespeicher simultan zur Fahrt abgebildet. Bei Bedarf, also bei vollständiger Entladung des Energiespeichers bis zu einer definierten Untergrenze, werden **Ladestationen** des jeweils unterstellten Systems zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt entlang der Streckenelemente errichtet. Die **Voraussetzungen** hierfür sind einerseits eine ausreichende **Infrastrukturbewertung** des jeweils auszustattenden Streckenelements sowie andererseits die **Verfügbarkeit** entsprechender **finanzieller Mittel** aus einem vorab festgelegten Budget. Andererseits wird bei Befahren einer Ladestation der **Ladevorgang des Energiespeichers** im Referenzfahrzeug berücksichtigt.

Durch unterschiedliche **Reihenfolgen bei der Abarbeitung** der Relationen einer Stichprobe entstehen bei dem beschriebenen Vorgehen **unterschiedliche räumliche Muster** der Anordnung von Ladestationen. Der Grund dafür ist, dass immer das erste Fahrzeug, das eine Kante befährt und dort eine **gültige Ladeanforderung** stellt (d.h. die Kante gehört zu einer Autobahn, die finanziellen Mittel stehen zur Verfügung und die Infrastrukturbewertung lässt dies zu), auf dieser Kante bzw. auch weiteren Kanten für den Bau einer Ladestation sorgt. Daher sollte bei jeder Anwendung des Verfahrens eine **Mindestanzahl an Simulationsexperimenten** durchgeführt werden, um belastbare Erkenntnisse zu erlangen. Ein **räumliches Muster von Ladestationen auf den Kanten** des Netzwerkgraphen (bzw. des Verkehrsnetzmodells) wird im Folgenden auch als **Netzkonfiguration** bezeichnet.

In Konsequenz ergibt sich daher nach Beendigung jedes Simulationsexperiments eine mögliche Netzwerkkonfiguration, die an eine **Optimierungskomponente** weitergegeben wird. Diese **bewertet** jede Netzwerkkonfiguration hinsichtlich einer **Zielfunktion** sowie der **Einhaltung von Nebenbedingungen** und ermittelt zunächst, ob die Netzwerkkonfiguration eine **zulässige Lösung** darstellt. Zusätzlich prüft die Optimierungskomponente, ob weitere Simulationsexperimente durchgeführt werden müssen oder ob deren erforderliche Anzahl erreicht ist. Außerdem verändert sie entsprechend des festgestellten Ergebnisses die variablen Parameter, die der Simulationskomponente zugrunde liegen (siehe Abschnitt 5.6). Der Verfahrensteil Lageermittlung beruht also aus methodischer Sicht auf einer **hierarchischen Kopplung eines Simulationsmodells mit einem Optimierungsmodell** (siehe auch Abschnitt 3.1.4).

In den nachfolgenden Abschnitten werden die an dieser Stelle nur kurz skizzierten Verfahrensteile eingehender beschrieben. An dieser Stelle soll noch kurz auf die notwendige Datengrundlage zur Anwendung des vorgeschlagenen Verfahrens eingegangen werden.

---

## Notwendige Datengrundlage

Die notwendige Datengrundlage für das Verfahren besteht zum ersten aus **Geodatenbanken**, die anwendungsfallbezogene Raum- und Flächeninformationen enthalten. Je nach Anwendungsfall werden verschiedene Bewertungskriterien berücksichtigt und somit unterschiedliche Geodatenbanken benötigt. Bezogen auf das Beispiel *eHighway* in Deutschland könnten dies z.B. Flächenpolygone von Natur- oder Wasserschutzgebieten sein. Außerdem werden für dieses Beispiel Informationen zu Siedlungsgebieten oder Flora-Fauna-Habitat-Gebieten benötigt.

Zum zweiten wird ein **Verkehrsnetzmodell von Straßen mit variablem Aggregationsgrad** benötigt. Sollte dies nicht möglich sein, kann ein mikroskopisch aufgelöstes Verkehrsnetzmodell schrittweise aggregiert werden, wozu eigene Verfahren zu entwickeln sind. Als Format bietet sich ein **Netzwerkgraph** mit bestimmten Kantenattributen an, die mit Blick auf den *eHighway* in Deutschland z.B. der Regelquerschnitt, die Fahrstreifenanzahl oder die Widmung sein. Zudem sollte entweder aus dem Verkehrsnetzmodell oder den Geodatenbanken der Standort von **Verkehrsbauwerken** wie Tunneln, Brücken, der Beschilderung etc. entnommen werden können. Gemeinsam sind die Geodatenbanken und das Verkehrsnetzmodell für die **Infrastrukturbewertung** eine Voraussetzung (siehe Abschnitt 5.4).

Zum dritten wird eine **Liste von Relationen** benötigt, die bspw. aus einer Verflechtungsmatrix erzeugt werden kann. Die Relationsliste kann einen **variablen Umfang** je nach dem betrachteten Planungsraum, dem Netzausschnitt bzw. dem gewählten Aggregationsniveau aufweisen (z.B. bei weitergehender Differenzierung nach Gütergruppen oder Lkw-Typ). In aller Regel umfasst sie z.B. für einen nationalen Planungsraum wie Deutschland einige Millionen Relationen. In aller Regel muss deswegen eine **Stichprobe** aus der Relationsliste gezogen werden um die Lösbarkeit eines gekoppelten Simulations- und Optimierungsmodells in angemessener Zeit sicherzustellen. Da jede Relation innerhalb der Stichprobe mit einem Fahrtenaufkommen versehen sein muss, wird dieser Vorgang im Folgenden als **Verfahrensteil Güterverkehrsnachfrage** bezeichnet.

---

## 5.4. Verfahrensteil Infrastrukturbewertung

Wie bereits in Abschnitt 5.2.1 als Anforderung formuliert, sollte mit Blick auf das Ziel einer möglichst umfassenden Bewertung verschiedener Energieversorgungssysteme für Lkw während der Fahrt die **bauliche Machbarkeit** einer **Ausstattung einzelner Streckenelemente** berücksichtigt werden können. Zu diesem Zweck wurde der eigenständige **Verfahrensteil Infrastrukturbewertung** entwickelt (Boltze et al. 2020).

Der Verfahrensteil ist, auch eigenständig und unabhängig von den anderen Verfahrensteilen, in **zwei verschiedenen Modi** einsetzbar, wie aus Abbildung 5-3 ersichtlich wird. Einerseits kann das Verfahren eingesetzt werden, um im sog. **Top-down-Modus** eine gegebene Menge an Teilstrecken bzw. Streckenabschnitten aus bautechnischer Perspektive zu bewerten und auf dieser Basis eine möglichst gute Verortung von Ladestationen auf den Teilstrecken zu erreichen. Außerdem können Varianten der Anordnung von Ladestationen definiert und vergleichend bewertet werden. Andererseits kann das Verfahren im sog. **Bottom-up-Modus** explorativ angewendet werden, um aus bautechnischer Perspektive günstige Anordnungen von Ladestationen zu ermitteln und so eine Abgrenzung von Streckenabschnitten zu erhalten. Zudem können Nutzwerte je Streckenelement bzw. dessen grundsätzliche Ausstattungsfähigkeit (in Form einer binären Aussage) ermittelt werden um diese Ergebnisse dem Verfahrensteil Lageermittlung zu übergeben.

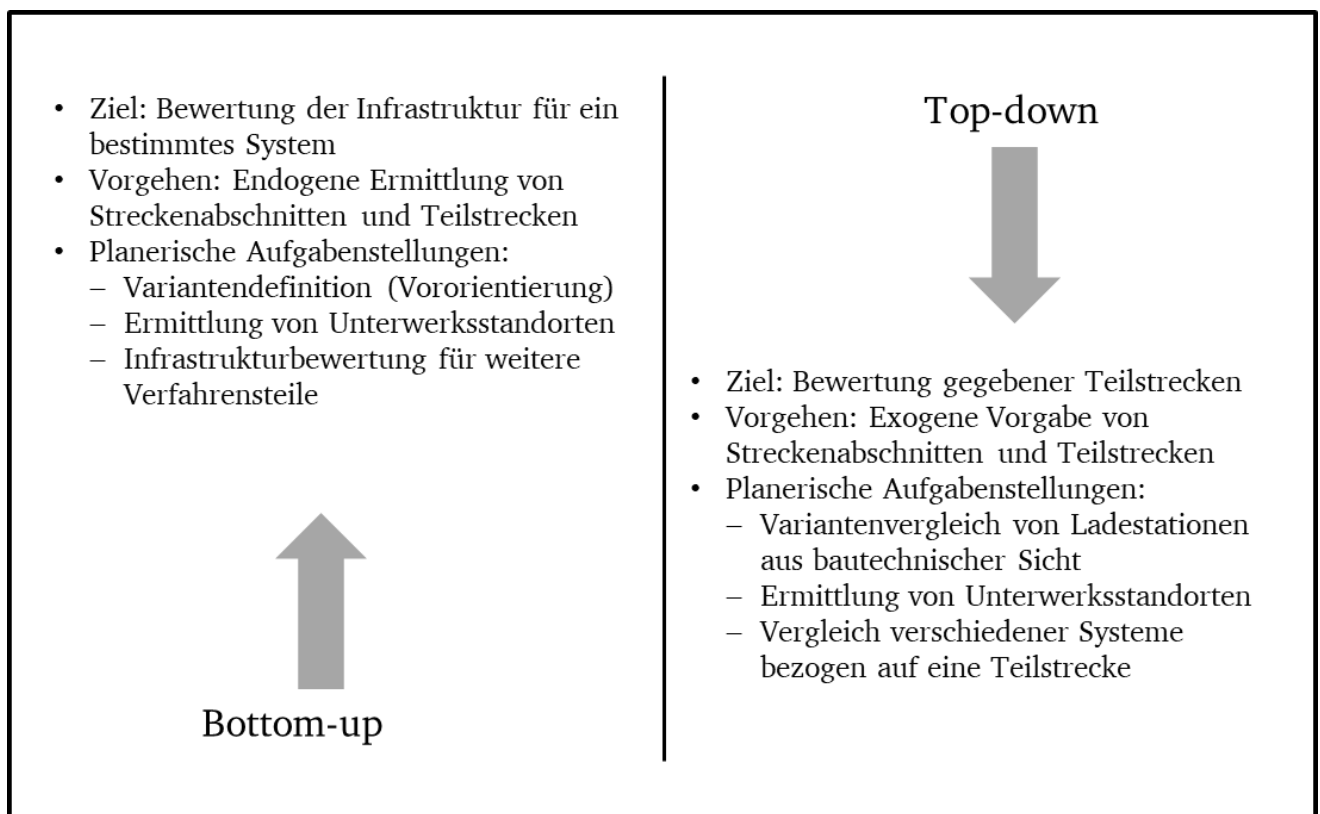


Abbildung 5-3: Verfahrensmodi in Abhängigkeit einer verkehrsplanerischen Aufgabenstellung  
(Quelle: eigene Darstellung).

---

Gemeinsamer Kern der beiden Verfahrensmodi ist es, einzelne Streckenelemente und -abschnitte eines beliebigen Verkehrsnetz-Ausschnittes auf Basis vorab definierter Kriterien hinsichtlich ihrer Ausstattungsfähigkeit mit infrastrukturseitig zu verbauenden Elementen von Systemen zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt zu bewerten.<sup>33</sup> Die Ergebnisse des Verfahrensteils erlauben einerseits eine **vergleichende Bewertung verschiedener Ausstattungsvarianten eines bestimmten Systems** zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt. Mittels des Verfahrensteils können sowohl einzelne Streckenelemente als auch Netzabschnitten hinsichtlich ihrer ausstattungsrelevanten Eigenschaften bewertet werden. Zudem können **unterschiedliche Systeme zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt vergleichend** im Hinblick auf ihre baulichen Anforderungen an das Verkehrsnetz untersucht werden. Im Ergebnis liefert der Verfahrensteil eine Kennzahl für jedes Streckenelement, die im Folgenden als **Infrastrukturbewertung** bezeichnet wird.

Für jedes Bewertungsvorhaben ist die Ableitung von entsprechenden Kriterien, nach denen bewertet werden soll, eine essentielle Voraussetzung (siehe Abschnitt 3.2.3.). Aus diesem Grund wurde zunächst ein umfassender **Kriterienkatalog** auf Basis einer Literaturanalyse definiert, der als Grundlage für die Bewertung eines Straßennetz-Ausschnittes dient. Auf Basis einer umfassenden Literaturanalyse wurde der Kriterienkatalog mittels mehrerer Expertengespräche zudem sukzessive verbessert und erweitert. Die Ergebnisse finden sich auch in Boltze *et al.* 2020. Eine Übersicht des gesamten Bewertungskriterienkatalogs ist in Anhang 1 gegeben. Für alle Kriterien wurde ein **mehrstufiges Bewertungsschema** für Streckenelemente und Streckenabschnitte entworfen, das sich methodisch an die **Nutzwertanalyse** anlehnt.

In den **folgenden Abschnitten** wird das **Bewertungsverfahren vorgestellt**. Zunächst werden einige begriffliche Festlegungen getroffen, bevor dann die Bewertungskriterien beschrieben werden. Abschließend wird eine Methode zur Ableitung einer Infrastrukturbewertung beschrieben, die den Kern des Verfahrensteils Infrastrukturbewertung bildet. Zudem wurde diese Methode als Software-Modul implementiert um teil- bis vollautomatisiert zu einer Infrastrukturbewertung beliebiger Netzausschnitte zu gelangen. Die technische Umsetzung ist in den Anhängen 2 und 3 beschrieben.

---

<sup>33</sup> Hinsichtlich der Implementierung des Verfahrensteils in ein Software-Tool können die Bewertungen einzelner Streckenelemente vorab erzeugt und automatisiert an das die Software zur Lageermittlung mit Hilfe einer Datenbank-Schnittstelle übertragen werden (siehe Anhang 3).

---

### 5.4.1. Begriffsbestimmungen

Zur **Bewertung der baulichen Machbarkeit** einer Ausstattung einzelner Abschnitte eines Netzausschnittes mit Systemkomponenten zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt muss zunächst festgelegt werden, welcher **räumliche Auflösungs- und Analysegrad** jeweils betrachtet wird. Dies wirkt sich unmittelbar auf die zum Tragen kommenden Bewertungskriterien aus. So wird bspw. eine **Bewertung auf Gesamtnetz-Ebene** vor allem auf Basis von Kriterien mit Bezug zur Verkehrsnachfrage erfolgen. Diese Bewertungskriterien sind z.B. die zu erwartenden durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärken (DTV) im Güterverkehr, ökologische Nutzenbeiträge oder Bau- und Betriebskosten pro Streckenelement.

**Bautechnische Kriterien**, wie z.B. Durchfahrtshöhen von Brücken oder die Verfügbarkeit von Einbauraum zur Errichtung der technischen Systemkomponenten, können auf **dieser Abstraktionsebene** in größerem Umfang jedoch im Regelfall **nicht berücksichtigt** werden. Diese **Gruppe von Bewertungskriterien** auf einer räumlich höheren Auflösung **beeinflusst** jedoch unmittelbar z.B. die Bau- und Betriebskosten auf einer **niedrigeren Auflösungsebene**.

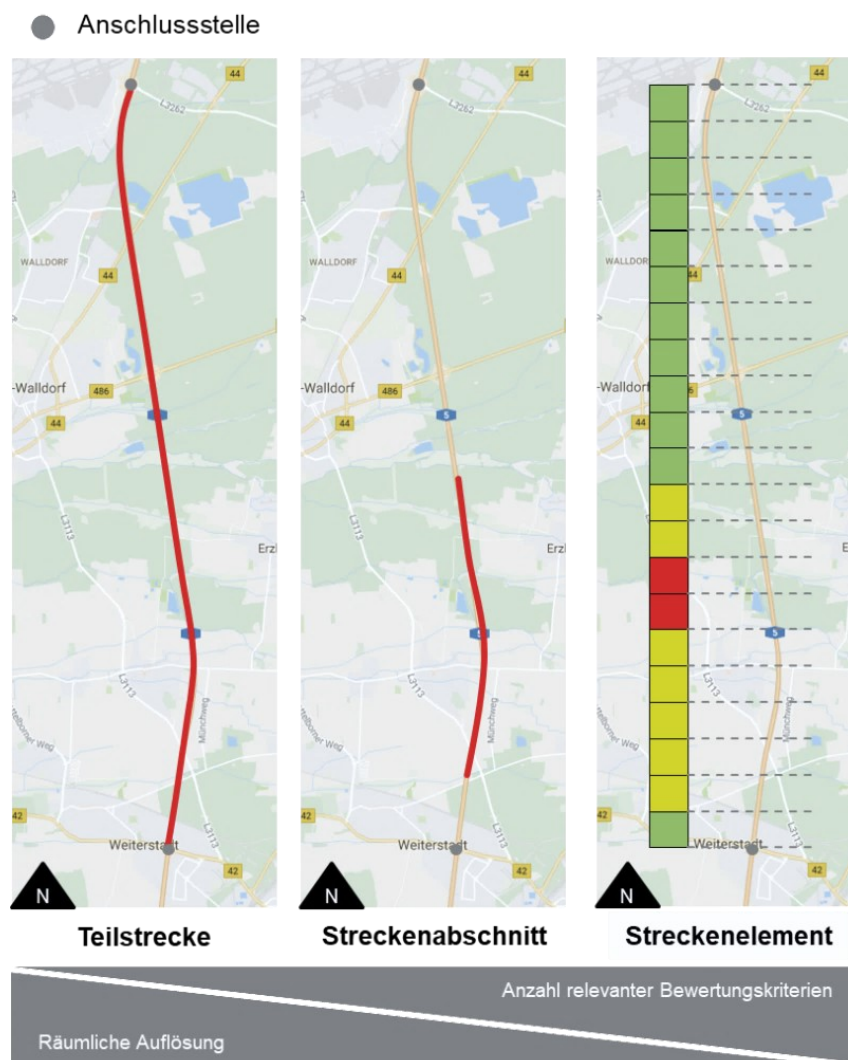


Abbildung 5-4: Illustration der Begriffe Teilstrecke, Streckenabschnitt und Streckenelement (Quelle: eigene Darstellung).



---

Bei einem eher **kleinräumigen Bewertungsvorhaben**, bspw. bei einer Bewertung eines wenige Kilometer langen Fernstraßenabschnitts zur Ermittlung der optimalen Lage einer Ladestation, kommt solchen bautechnischen Kriterien hingegen jedoch eine höhere Bedeutung zu, volkswirtschaftliche oder verkehrsnachfragebezogene Kriterien treten hier dafür in den Hintergrund. Zur Unterscheidung dieser verschiedenen Raumauflösungsgrade werden zunächst drei Begriffe eingeführt: **Teilstrecke**, **Streckenabschnitt** und **Streckenelement**. In Abbildung 5-4 sind die unterschiedlichen Bedeutungen der Begriffe veranschaulicht worden.

Eine **Teilstrecke** bezeichnet im Kontext dieser Ausführungen eine Verbindung zweier vorab festgelegter Netzknoten (z.B. Anschlussstellen) durch einen Abschnitt einer oder mehrerer Straßen in einer bestimmten Fahrtrichtung. Eine Teilstrecke kann folglich eine variable Länge aufweisen und zwischen den beiden begrenzenden Netzknoten auch weitere Netzknoten wie z.B. Autobahnkreuze bzw. -dreiecke oder Anschlussstellen enthalten. Aus planerischer Sicht können auf einer Teilstrecke eine oder mehrere Ladestationen errichtet werden, auch eine Vollausrüstung kommt ggf. in Frage.

Unter einem **Streckenelement** hingegen wird im Kontext des hier beschriebenen Bewertungsverfahrens die kleinstmöglich sinnvolle Raumeinheit innerhalb einer Teilstrecke verstanden. Streckenelemente weisen im Gegensatz zu Teilstrecken eine vorab festgelegte Länge auf, sie ergeben sich durch die gedachte Segmentierung einer Teilstrecke in Intervalle gleicher Länge (wobei dies praktisch insbesondere bei Streckenelementen in Randlage unter Umständen nicht möglich sein wird). Eine Orientierung an der Betriebskilometrierung und somit eine Länge der Streckenelemente von in der Regel 100 Meter bietet sich zur Segmentierung an. Eine sinnvolle Einteilung ergibt sich aber in jedem Falle aus der jeweiligen Planungsaufgabe bzw. dem zugrundeliegenden System. Im Falle des *eHighway*-Systems sollten die Abstände zwischen den Oberleitungsmasten im Regelfall etwa 40 bis 60 Meter betragen, weswegen 40 Meter also auch die Mindestlänge eines Streckenelements sein sollten (Siemens AG et al. 2016).

Eine zweckgebundene Zusammenfassung einer bestimmten Menge von Streckenelementen innerhalb einer Teilstrecke wird hier als **Streckenabschnitt** bezeichnet. Einige Kriterien können nur auf der Ebene mehrerer Streckenelemente sinnvoll erfasst bzw. bewertet werden. So ergibt sich bspw. in einem Wechselspiel aus zu erwartender Verkehrsnachfrage unterhalb einer OLS und deren räumlicher Lage die Anzahl und die Standorte der benötigten Unterwerke zur Energieversorgung.

In Bezug auf das **Beispiel der eHighway-Pilotstrecke** in Hessen ist die zu analysierende Teilstrecke durch die Anschlussstellen Zeppelinheim und Weiterstadt begrenzt während die Anschlussstelle *Langen-Mörfelden* zur Teilstrecke gehört (siehe Abbildung 5-4, links). Die *eHighway*-Teilstrecke umfasst beide Fahrtrichtungen und wurde auf Basis der vorhandenen Betriebskilometrierung in Streckenelemente aufgeteilt (rechter Teil der Abbildung 5-4). Zur Bewertung möglicher Unterwerks-Standorte oder Landeplätze für Rettungshubschrauber wurden verschiedene Streckenelemente iterativ zu Streckenabschnitten zusammengefasst (Mitte der Abbildung 5-4).

---



---

#### 5.4.2. Methode zur Infrastrukturbewertung

Einige **Bewertungskriterien** greifen erst bei einer **Zusammenfassung von Streckenelementen zu Streckenabschnitten**. Als Beispiel hierfür dient die Wahl bzw. die Bewertung von Unterwerks-Standorten: die Standorte können erst dann ermittelt werden, wenn Kenntnis über die Ausstattungsfähigkeit der Streckenelemente innerhalb des betrachteten Netzausschnittes herrscht, da sich hieraus die Stationsgrenzen in jede Richtung ergeben. Andere Kriterien können sinnfälliger Weise **ausschließlich auf Ebene der Streckenelemente** bewertet werden, z.B. beschilderungsbedingte Höheneinschränkungen.

Zusätzlich wirken sich die **Bewertungsergebnisse** auf Ebene der **Streckenelemente** auch auf **übergeordnete Ebenen** aus (z.B. bei seitenraum- oder höhenrelevanten Einschränkungen, die eine Ausstattung eines fokalen Streckenelements mit bestimmten Systemen unmöglich macht und so implizite Grenzen von Ladestationen erzeugt werden). Außerdem hängen wesentliche, für eine Bewertung relevante Parameter von den Ergebnissen einer **vor- oder nachgelagerten Modellierung der Verkehrsnachfrage** ab. Hieraus können z.B. der DTV und die auszustattende Länge in Kilometern abgeleitet werden.

Aufgrund der **beschriebenen Abhängigkeiten bzw. Wechselwirkungen** sollte eine Methode, die eine gesamthafte und umfassende **Bewertung** ermöglicht, **sequentiell** aufgebaut sein. Vor dem Hintergrund dessen wird hier eine **mehrstufige, multikriterielle Infrastruktur- Bewertungsmethode** vorgeschlagen, die sowohl für einzelne Streckenelemente, Streckenabschnitte oder Teilstrecken anwendbar ist und diese aus einer planerisch-bautechnischer Perspektive bewertet. Einen Überblick über den Aufbau der Bewertungsmethode liefert Abbildung 5-5 auf der nächsten Seite. Dieses Ablaufdiagramm ist eine Detaillierung des **Verfahrensteil Infrastrukturbewertung** aus Abbildung 5-1.

Das Verfahren beginnt mit der **Festlegung des zu bewertenden Netzausschnittes** bzw. des Planungsraums. Dies kann z.B. eine Teilstrecke sein, die im Rahmen der Verkehrsnachfragemodellierung als besonders ausstattungsrelevant erkannt worden ist und somit ein Teil einer Netzkonfiguration. Außerdem kann es eine beliebige Teilstrecke sein, die z.B. vergleichend bezüglich verschiedener Systeme bewertet werden soll. Daran anknüpfend sollte das **Energieversorgungssystem**, das für die Bewertungsmethode zugrunde liegt, gewählt werden. Aus diesen beiden Vorabfestlegungen lässt sich nun ableiten, welche **Bewertungskriterien** einerseits prinzipiell einschlägig wären. Andererseits können die zu berücksichtigenden Bewertungskriterien in Abhängigkeit der jeweils vorliegenden planerischer Aufgabenstellung variieren. Für eine Vororientierung im Rahmen des Verkehrsplanungsprozesses können andere Kriterien relevant sein wie für einen Variantenvergleich im Rahmen der Maßnahmenuntersuchung. Aus diesem Grund erfolgt nun eine Festlegung dazu, welche Kriterien mit ein die Bewertung einbezogen werden sollen.

Auf Basis der Festlegungen zum Energieversorgungssystem und dem Netzausschnitt erfolgt nun eine **Einteilung des zu bewertenden Netzausschnittes in Streckenelemente**. Hier empfiehlt es sich, auf die Ebene der Betriebskilometrierung zurückzugreifen, da häufig die Position relevanter Verkehrsbauwerke oder der Beschilderung lediglich relativ zum Beginn der Betriebskilometrierung angegeben und somit nicht exakt mittels Koordinatenpaaren festgelegt ist (o. A. 2018b).

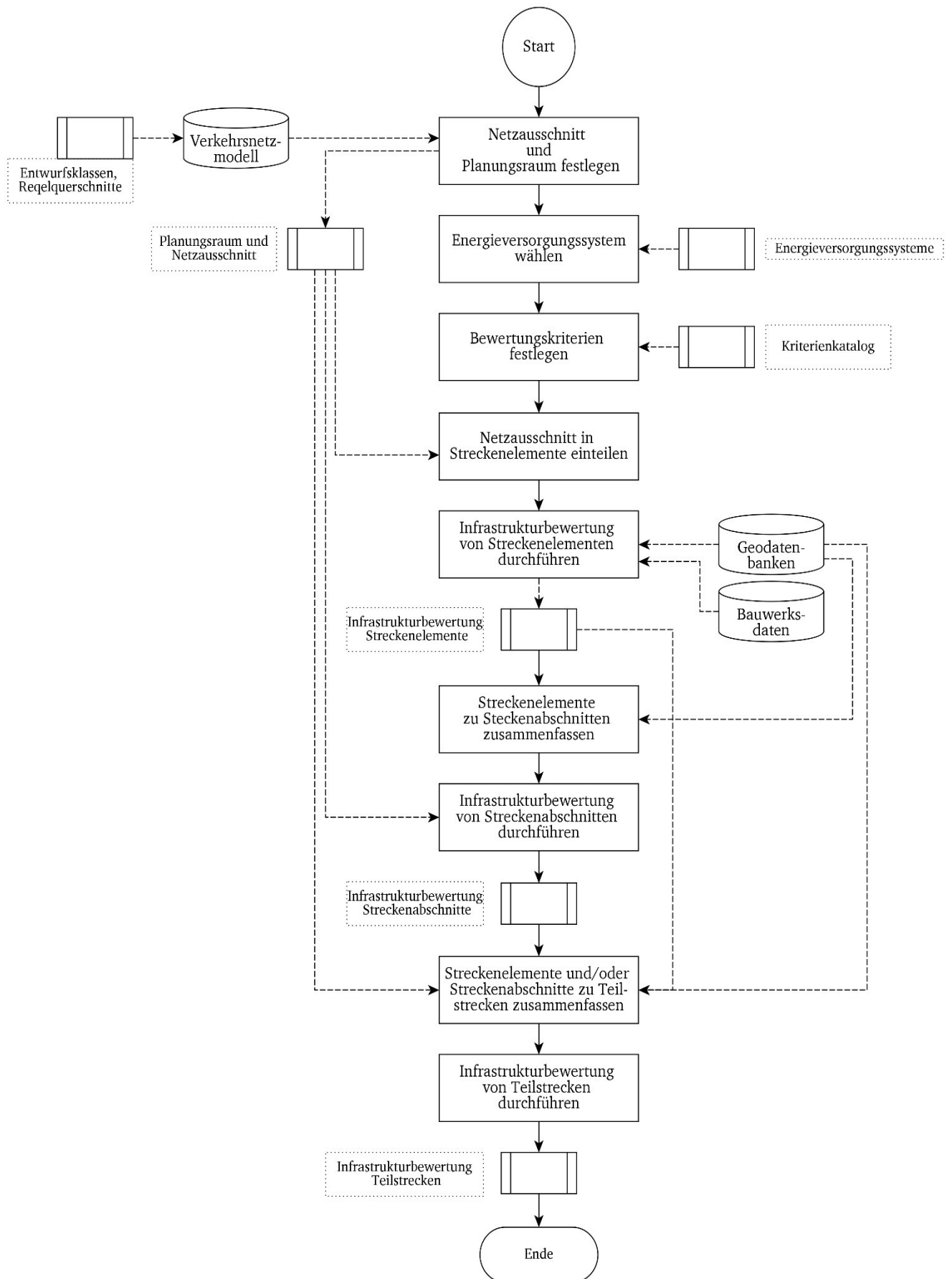


Abbildung 5-5: Ablauf des Verfahrensteils Infrastrukturbewertung  
(Quelle: eigene Darstellung).

---

Unter Rückgriff auf den Bewertungskriterien-Katalog auf der einen Seite sowie den in Streckenelementen eingeteilten Netzabschnitt werden nun die **Streckenelemente** auf Basis der dort einschlägigen Kriterien **bewertet**. Aus methodischer Sicht wird hier auf eine modifizierte Nutzwertanalyse zurückgegriffen. Im Unterschied zu einer klassischen Nutzwertanalyse können aber einerseits nicht nur disjunkte Entscheidungsalternativen bewertet werden (z.B. bestimmte Varianten der Anordnung einer Ladestation innerhalb einer Teilstrecke), sondern auch jedes einzelne Streckenelement. Dazu wird jedem Streckenelement auf Basis von dessen Eigenschaften Punktwerte zugewiesen. Je nach Ausprägung dieses Nutzwertes wird über die Ausstattungsfähigkeit des Streckenelements entschieden. Die Ergebnisse dieses Verfahrensschrittes, insbesondere Informationen zu nicht ausstattbaren Streckenelementen, die Einteilung in Streckenelemente sowie die Punktwerte je Streckenelement, werden anschließend an den Verfahrensteil Lageermittlung übergeben.

Aufbauend auf den Bewertungsergebnissen auf Ebene der Streckenelemente erfolgt in einem Zwischenschritt nun eine **Aggregation** der einzelnen **Streckenelemente zu Streckenabschnitten**. Die Aggregationsregeln ergeben sich anwendungsfallspezifisch aus den technischen Rahmenbedingungen des jeweiligen Systems auf der einen Seite und den Ergebnissen aus einer externen Verkehrsnachfragemodellierung auf der anderen Seite. Eine solche Untersuchung liefert zum Beispiel das durchschnittliche, zu erwartende Verkehrsaufkommen je Zeitscheibe oder die auszustattenden Teilstrecken im Verkehrsnetzmodell. Die voraussichtliche Verkehrsnachfrage einer Ladestation determiniert deren elektrotechnische Auslegungsparameter wie die vorzuhaltende Dauerleistung, was wiederum z.B. die maximalen Unterwerksabstände festlegt, sodass ein Streckenabschnitt einen einzelnen Einspeiseabschnitt darstellen kann.

In einem weiteren Prozessschritt wird dann für jede Teilstrecke eine **Bewertung der definierten oder ermittelten Streckenabschnitte** mittels der hier einschlägigen Kriterien vorgenommen. Aus methodischer Sicht kann zur Bewertung der Streckenabschnitte ebenfalls die erwähnte, modifizierte Nutzwertanalyse zum Einsatz kommen. Hieraus wird, falls keine Vollaussattung der jeweiligen Teilstrecke notwendig ist, auch die Lage der auszustattenden Streckenabschnitte inklusive der Unterwerksstandorte innerhalb einer Teilstrecke ermittelt.

Die Streckenabschnitte werden nun in einem weiteren Schritt zu Teilstrecken zusammengefasst. Diese Teilstrecken können entweder mit den ex ante definierten Teilstrecken verglichen werden oder als eine Netzkonfiguration auch aus anderen Perspektiven bewertet werden (z.B. Nutzen-Kosten-Analyse auf volkswirtschaftlicher Ebene). Außerdem können sich z.B. auf Grundlage der bautechnischen Bewertung die unterstellten Baukostensätze der Ladestationen je Kilometer innerhalb dieser Teilstrecken verändern. Aus **bautechnischer Perspektive** ist nun aber die eigentliche **Infrastrukturbewertung abgeschlossen**.

Der bautechnischen **Bewertung einzelner Streckenelemente bzw. Streckenabschnitte** kommt mit Blick auf die Zielsetzung dieser Arbeit wegen der unmittelbaren Integrationsfähigkeit der Bewertungsergebnisse in das Lösungsverfahren eine größere Bedeutung zu als dies für die Bewertung der Teilstrecken gilt. Diese ist vielmehr anwendungsfallspezifisch zu modifizieren. Daher wird die Bewertung von Streckenelementen und -abschnitten im Folgenden vertieft behandelt, während die Bewertung von Teilstrecken vernachlässigt wird.

---

#### 5.4.2.1. Bewertungskriterien

Wie bereits in den einführenden Anmerkungen dargelegt, wurde als erster Arbeitsschritt ein **Katalog relevanter Kriterien** zur Bewertung von Streckenelementen und Streckenabschnitten hinsichtlich deren Ausstattungspotentials mit Systemen zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt entwickelt. Die Kriterien, die für eine Bewertung der Streckenelemente und -abschnitte herangezogen werden sollten, unterscheiden sich in Abhängigkeit des jeweils betrachteten Systems. Insbesondere die Form der Energieübertragung spielt hierbei eine entscheidende Rolle. Aus der Abbildung 5-7 auf der folgenden Seite lässt sich daher ablesen, welche Kriterien auf Ebene der Streckenelemente jeweils einschlägig sind. Eine detaillierte Darstellung des Kriterienkatalogs mitsamt der jeweils definierten Bewertungsstufen findet sich in Anhang 1.

Bei der Definition der Bewertungskriterien, sowohl für Streckenelemente als auch -abschnitte, war die Leitfrage, welche **lokalen bautechnischen Eigenschaften oder topologische Gegebenheiten** eines bestimmten Streckenelements oder -abschnitts dazu führen können, dass dieses **nicht oder** aller Voraussicht nach nur **mit höheren Aufwand** als im Regelfall üblich mit Systemelementen zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt ausgestattet werden kann. Die gefundenen Kriterien lassen sich in fünf verschiedene Kategorien ordnen, eine Auflistung der definierten Kriterien liefert Abbildung 5-6:

1. Planungsrechtliche Eigenschaften,
2. Eigenschaften der Flächen- und Bodenbeschaffenheit,
3. Entwurfs- und Ausführungsbedingte Eigenschaften,
4. Elektrotechnische Eigenschaften sowie
5. Bau- und straßenbetriebliche Eigenschaften.

Der **Kategorie Planungsrechtliche Eigenschaften** sind solche Kriterien zugeordnet, die insbesondere in der **Phase der Planung und Genehmigung** einer Ladestation relevant werden. Die ausschließlich auf Ebene der **Streckenabschnitte** sinnvoll anwendbaren Kriterien beziehen sich zum Beispiel auf Aspekte wie der Notwendigkeit zur Durchführung eines **Raumordnungs- oder Planfeststellungsverfahrens** bei Ausstattung des betrachteten Streckenabschnitts oder auf umweltrechtliche Aspekte (**Umweltverträglichkeitsprüfung**). Für Streckenabschnitte sollten außerdem eventuell bestehende **Ausbaupläne im Rahmen des Bundesverkehrswegeplans** (z.B. Ergänzung weiterer Fahrstreifen) mit in eine Bewertung eingehen. Daneben sollte auf Ebene der Streckenabschnitte die **Grundeigentumsverhältnisse** bewertet werden, was insbesondere für Unterwerksstandorte relevant ist.

---

Kategorie	Krit.-Nr.	Ebene	Bezeichnung
Planungsrechtliche Eigenschaften	SA-1	SA	Raumordnungsverfahren
	SA-2	SA	Umweltverträglichkeitsprüfung
	SA-3	SA	Planfeststellungsverfahren
	SA-4	SA	Bundesverkehrswegeplan
	SA-5	SA	Grundeigentum
Eigenschaften der Flächen- und Bodenbeschaffenheit	SE-6	SE	Nähe zu besiedelten Gebieten*
	SE-7	SE	Wasserschutzgebiete*
	SE-8	SE	Naturschutzgebiete*
	SE-9	SE	Natura 2000* (FFH-Gebiete, Vogelschutzgebiete)
	SE-10	SE	Landschaftsschutzgebiete*
	SE-11	SE	Forstwirtschaftliche Gebiete*
	SE-12	SE	Kampfmittelbelastete Gebiete
	SA-13	SA	Bodenbeschaffenheit
	SA-14	SA	Höhenprofil
Entwurfs- und Ausführungsbedingte Eigenschaften	SE-15	SE	Längsrelevante Ingenieurbauwerke
	SE-16	SE	Beschilderung
	SE-17	SE	Lärmschutzeinrichtungen
	SE-18	SE	Nothaltebuchten
	SE-19	SE	Fahrzeugrückhaltesysteme
	SE-20	SE	Knotenpunkttyp
	SE-21	SE	Anschlussstellen-Typ
	SE-22	SE	Rastanlage
	SE-23	SE	Temporäre Seitenstreifenfreigabe
	SE-24	SE	Höhenrelevante Bauwerke
Elektrotechnische Eigenschaften	SA-25	SA	Energieversorgung
	SE-26	SE	Elektrisches Schutzkonzept
	SA-27	SA	Standorte für Unterwerke
Bau- und Straßenbetriebliche Eigenschaften	SA-28	SA	Baubetrieb
	SA-29	SA	Sichtbarkeit der vorhandenen Beschilderung
	SE-30	SE	Schwer-/ Großraumtransporte

**Legende:**

SE: Streckenelement

SA: Streckenabschnitt

**Erläuterungen:** \* Minimale Distanz (Luftlinie)

Abbildung 5-6: Übersicht der Bewertungskriterien nach Bewertungsobjekt und Kategorie  
(Quelle: eigene Darstellung).

---

Kriterien der **Kategorie Eigenschaften der Flächen- und Bodenbeschaffenheit** beziehen sich auf die geographisch-topologische Einbettung des betrachteten Netzausschnitts bzw. der Streckenelemente und Streckenabschnitte darin. Darunter fallen auf Ebene der Streckenelemente zum Beispiel **gesetzlich vorgeschriebene** oder aus planerischer Sicht sinnvolle **Mindestabstände** zu bestimmten Gebietstypen oder weiteren Anlagen, deren Nichteinhaltung zur Verzögerung oder zum Verbot der Errichtung einer Ladestation führen kann. Zudem fällt eine Bewertung der zu erwartenden **Kampfmittelbelastung** hierunter. Auf Ebene der Streckenabschnitte werden bei bestimmten Energieversorgungssystemen zudem das **Höhenprofil** sowie die **Bodenbeschaffenheit** relevant. Die **Kriterienkategorie** ist somit insbesondere in der Phase der **Variantendefinition** bzw. der **Vororientierung** im Verkehrsplanungsprozess maßgeblich (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen 2001).

Die Kategorie der **Entwurfs- und Ausführungsbedingte Eigenschaften**, die ausschließlich auf der Ebene der Bewertung von Streckenelementen greift, umfasst Kriterien, die die konkrete **bautechnische Ausführung** bzw. die **planerische Gestaltung** eines Streckenelements für eine Bewertung abbilden sollen. Dazu zählen z.B. die **Entwurfsklasse** bzw. der **Regelquerschnitt**, das Vorhandensein von **Lärmschutzeinrichtungen** oder **Fahrzeugrückhaltesystemen** sowie **Bauwerke** oder andere Begebenheiten, die zu einer Einschränkung des zur Verfügung stehenden, seitlichen Bauraums führen. Daneben werden **seitenraumrelevante Einschränkungen** betrachtet, die eine Errichtung von Systemkomponenten verhindern bzw. erschweren würden. Hierzu zählen das Vorhandensein einer Anschlussstelle, eines Netzknotens oder anderer Verkehrsbauwerke innerhalb des Streckenelements. Daneben werden Teile des Zubehörs einer Autobahn (z.B. verschiedene **Ausführungen der Beschilderung**) betrachtet. In die Kategorie fallen auch höhenrelevanten Einschränkungen durch Bauwerke, Anzeigequerschnitte von Strecken- oder Netzbeeinflussungsanlagen oder die Beschilderung.

**Elektrotechnische Eigenschaften** sind in einer weiteren Kategorie zusammengefasst worden. Hierzu zählen auf Ebene der Streckenelemente die Bewertung potentieller **Unterwerksstandorte** sowie Aspekte der **Energieversorgung** wie die Distanz zum **Mittelspannungsnetz**, um hier einen Anschluss der Ladestation herstellen zu können. Daneben ergeben sich Eigenschaften bzw. Anforderungen aus dem **elektrischen Schutzkonzept**, das bestimmte Mindestabstände von und zu Anlagenteilen vorschreibt.

Schließlich umfasst die Kategorie der **bau- und straßenbetrieblichen Eigenschaften** diejenigen Kriterien, die während oder nach der Errichtung einer Ladestation im jeweiligen Streckenelement aus Sicht des Straßen- bzw. Baubetriebs relevant werden. Hierzu zählen die **Sichtbarkeit der Beschilderung** sowie die **Durchführbarkeit von Schwer- bzw. Großraumtransporten** nach Errichtung einer Ladestation. Daneben fallen in diese Kategorie baubetriebliche Aspekte, die sich auf den Straßenbetrieb während der Errichtungsphase auswirken können, z.B. das Vorhandensein von Abladelätzen und anderen Baustelleneinrichtungen.

Einige **Kriterien** sind nur für **bestimmte Formen der Energieübertragung** relevant (siehe Abschnitt 4.1 zu den Formen der Energieübertragung). So sind z.B. die höhenrelevanten Einschränkungen nur für Systeme zu berücksichtigen, die auf eine Energieübertragung von oben zurückgreifen. Außerdem müssen bspw. bestimmte seitenraumrelevante Einschränkungen im Falle der Energieübertragung von unten nicht betrachtet werden (mit Ausnahme der Standorte für Unterwerke). Aus diesem Grund wurde für jedes Kriterium und jede Form der Energieübertragung festgelegt, ob das jeweilige **Kriterium** hinsichtlich der **Form der Energieübertragung** einschlägig ist oder nicht, was im folgenden Abschnitt noch eingehender erläutert wird.

---

Kategorie	Krit.-Nr.	Ebene	Bezeichnung	Form der Energieübertragung		
				von oben	von unten	seitlich
Planungsrechtliche Eigenschaften	SA-1	SA	Raumordnungsverfahren	x		
	SA-2	SA	Umweltverträglichkeitsprüfung	x		
	SA-3	SA	Planfeststellungsverfahren	x		
	SA-4	SA	Bundesverkehrswegeplan	x	x	x
	SA-5	SA	Grundeigentum	x	x	x
Eigenschaften der Flächen- und Bodenbeschaffenheit	SE-6	SE	Nähe zu besiedelten Gebieten*	x		
	SE-7	SE	Wasserschutzgebiete*	x	x	x
	SE-8	SE	Naturschutzgebiete*	x	x	x
	SE-9	SE	Natura 2000* (FFH-Gebiete, Vogelschutzgebiete)	x		
	SE-10	SE	Landschaftsschutzgebiete*	x		
	SE-11	SE	Forstwirtschaftliche Gebiete*	x		
	SE-12	SE	Kampfmittelbelastete Gebiete	x	x	x
	SA-13	SA	Bodenbeschaffenheit	x		
	SA-14	SA	Höhenprofil	x		x
Entwurfs- und Ausführungsbedingte Eigenschaften	SE-15	SE	Längsrelevante Ingenieurbauwerke	x		x
	SE-16	SE	Beschilderung	x		x
	SE-17	SE	Lärmschutzeinrichtungen	x		x
	SE-18	SE	Nothaltebuchten	x		x
	SE-19	SE	Fahrzeugrückhaltesysteme	x		x
	SE-20	SE	Knotenpunkttyp	x	x	x
	SE-21	SE	Anschlussstellen-Typ	x		x
	SE-22	SE	Rastanlage	x		x
	SE-23	SE	Temporäre Seitenstreifenfreigabe	x		x
	SE-24	SE	Höhenrelevante Bauwerke	x		x
Elektrotechnische Eigenschaften	SA-25	SA	Energieversorgung	x	x	x
	SE-26	SE	Elektrisches Schutzkonzept	x	x	x
	SA-27	SA	Standorte für Unterwerke	x	x	
Bau- und Straßenbetriebliche Eigenschaften	SA-28	SA	Baubetrieb	x	x	x
	SA-29	SA	Sichtbarkeit der vorhandenen Beschilderung	x		
	SE-30	SE	Schwer-/ Großraumtransporte	x		x

Legende: SE: Streckenelement  
SA: Streckenabschnitt

Erläuterungen: \* Minimale Distanz (Luftlinie)

Abbildung 5-7: Relevanz der Bewertungskriterien in Abhängigkeit der Form der Energieübertragung (Quelle: eigene Darstellung).



---

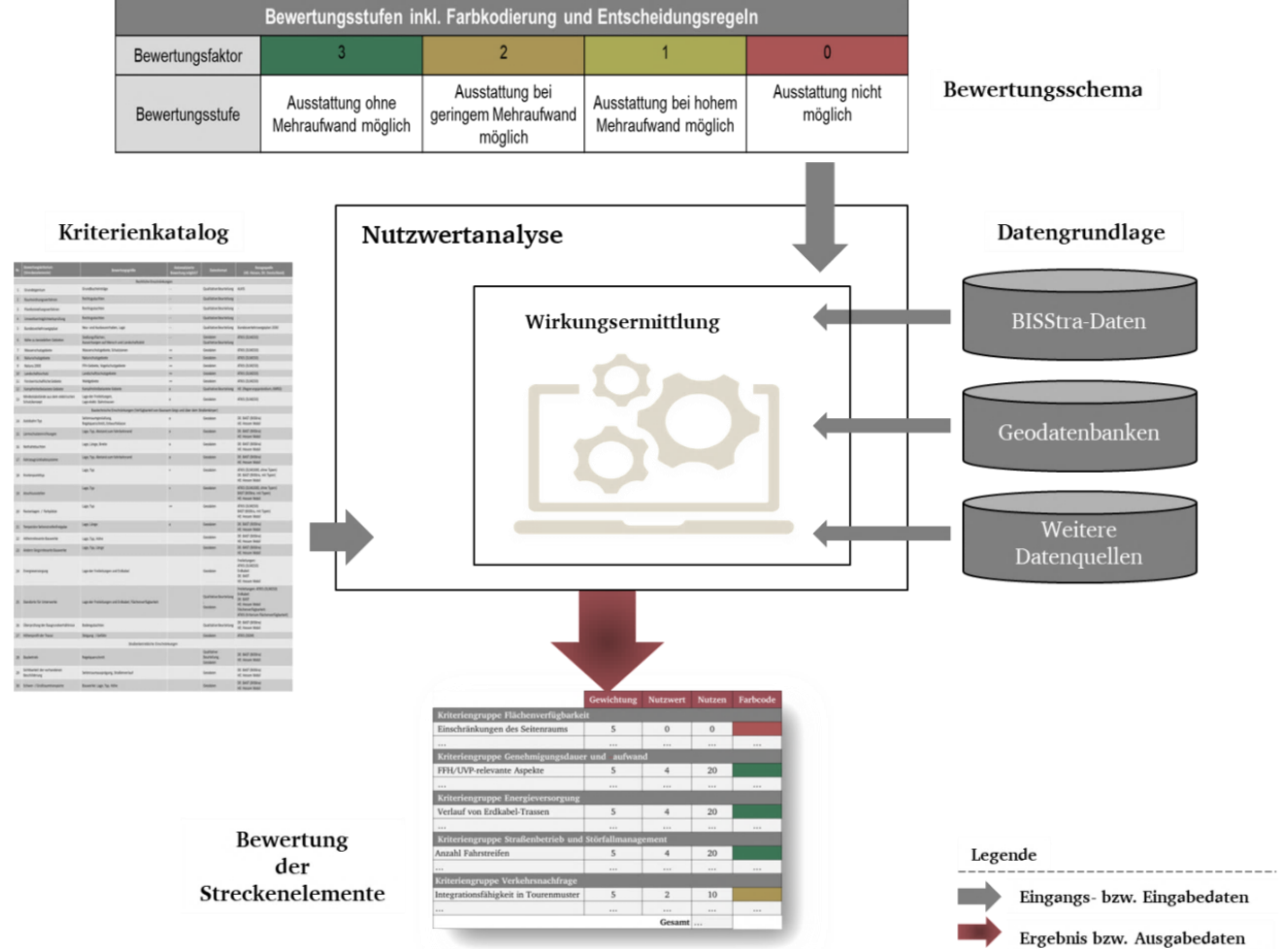


Abbildung 5-8: Schematische Darstellung des Vorgehens bei der Bewertung von Streckenelementen (Quelle: eigene Darstellung).

Im Rahmen des hier dargestellten Vorgehens wird mittels der **Nutzwertanalyse** jedem Streckenelement innerhalb der betrachteten Teilstrecke ein **individueller Nutzwert** zugewiesen. Der Nutzwert stellt also einen **Indikator** für die **Ausstattungsfähigkeit des Streckenelements** mit Systemkomponenten zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt dar, auf dessen Basis entschieden werden kann. In diesem Sinne ist jedes Streckenelement also eine disjunkte Alternative im Sinne der Nutzwertanalyse. Eine Übersicht der Kriterien, die auf Ebene der Streckenelemente greifen, gibt Abbildung 5-9.

Krit.-Nr.	Ebene	Bewertungskriterien	Ausstattung nicht möglich	Ausstattung mit hohem Mehraufwand möglich	Ausstattung mit geringem Mehraufwand möglich	Ausstattung ohne Mehraufwand möglich
		Teilnutzwert	0	1	2	3
Eigenschaften der Flächen- und Bodenbeschaffenheit						
SE-6	SE	Nähe zu besiedelten Gebieten*	50 m	100 m	200 m	>300 m
SE-7	SE	Wasserschutzgebiete*	0 m	10 m	20 m	>30 m
SE-8	SE	Naturschutzgebiete*	0 m	10 m	20 m	>30 m
SE-9	SE	Natura 2000* (FFH-Gebiete, Vogelschutzgebiete)	0 m	10 m	20 m	>30 m
SE-10	SE	Landschaftsschutzgebiete*	0 m	10 m	20 m	>30 m
SE-11	SE	Forstwirtschaftliche Gebiete*	0 m	10 m	20 m	>30 m
SE-12	SE	Kampfmittelbelastete Gebiete	-	Kampfmittelbelastung zu erwarten	-	Keine Kampfmittelbelastung zu erwarten
Eigenschaften der Flächen- und Bodenbeschaffenheit						
SE-15	SE	Längsrelevante Ingenieurbauwerke	Tunnel, und/oder Brückenbauwerk >50 m vorhanden	-	-	Kein Tunnel und/ oder Brückenbauwerk >50 m vorhanden
SE-16	SE	Beschilderung	-	Mehrere Standorte für Schilder im Streckenelement	Wenige Standorte für Schilder im Streckenelement	Keine Standorte für Schilder im Streckenelement
SE-17	SE	Lärmschutzeinrichtungen	Lärmschutzeinrichtung liegt vor, kein ausreichender Abstand zum Fahrbahnrand, kann nicht versetzt werden	Lärmschutzeinrichtung liegt vor, kein ausreichender Abstand zum Fahrbahnrand, kann versetzt werden	Lärmschutzeinrichtung liegt vor, ausreichender Abstand zum Fahrbahnrand	Keine Lärmschutzeinrichtung vorhanden
SE-18	SE	Nothaltebuchten	-	-	Nothaltebucht vorhanden, Ausleger verlängern	Keine Nothaltebucht im Streckenelement
SE-19	SE	Fahrzeugrückhaltesysteme	Zusätzliche Fläche von 0,8 m nicht frei,	Zusätzliche Fläche von 0,8 m frei,	Zusätzliche Fläche von 0,8 m frei,	Zusätzliche Fläche von 0,8 m frei,
			keine Schutzeinrichtung vorhanden	keine Schutzeinrichtung vorhanden	Umrüstung der Schutzeinrichtung auf Typ H4b	Schutzeinrichtung mit Typ H4b vorhanden
SE-20	SE	Knotenpunkttyp	Ein Knotenpunkt liegt im Streckenelement	-	-	Kein Knotenpunkt liegt im Streckenelement
SE-21	SE	Anschlussstellen-Typ	A3, A4, A5, A6, A7 und A8 und E3, E4 und E5 liegen im Streckenelement	-	A1, A2 oder E1, E2 liegen im Streckenelement	Keine Anschlussstelle im Streckenelement
SE-22	SE	Rastanlage	-	-	Rastanlage vorhanden	Keine Rastanlage vorhanden
SE-23	SE	Temporäre Seitenstreifenfreigabe	Temporäre Seitenstreifenfreigabe vorhanden	-	-	Temporäre Seitenstreifenfreigabe nicht vorhanden
SE-22	SE	Höhenrelevante Bauwerke	Lichte Höhe BW < 4,65 m	4,65 m ≤ Lichte Höhe BW < 4,8 m	4,8 m ≤ Lichte Höhe BW ≥ 6 m	Kein Bauwerk im Streckenabschnitt oder Lichte Höhe BW > 6,00 m
Eigenschaften im Hinblick auf das elektrische Schutzkonzept						
SE-25	SE	Elektrisches Schutzkonzept	-	Mindestabstände werden nicht eingehalten	-	Alle Mindestabstände werden eingehalten
Bau- und straßenbetriebliche Eigenschaften						
SE-29	SE	Schwer-/ Großraumtransporte	Lichtraumprofil bis 4,5 m eingeschränkt	-	-	Lichtraumprofil bis 4,5 m uneingeschränkt

Legende: SE: Streckenelement

Erläuterungen: \* Minimale Distanz (Luftlinie)

Abbildung 5-9: Übersicht der Kriterien auf Ebene der Streckenelemente  
(Quelle: eigene Darstellung).

Für jedes **Bewertungskriterium**, das auf **Ebene der Streckenelemente** einschlägig ist, müssen zunächst **Bewertungsstufen** definiert werden, die festlegen, bei welchen erkannten Wirkungen hinsichtlich eines Kriteriums welcher **Teilnutzwert** vergeben wird. Ein Vorschlag für solche Bewertungsstufen ist in Abbildung 5-9 zu finden. Die **Mehrheit** der auf **Ebene der Streckenelemente** einschlägigen **Bewertungskriterien** weisen demnach **quantifizierbare Schwellenwerte** zur Punktwertvergabe auf.

---

Für Bewertungskriterien, bei denen **keine quantifizierbaren Bewertungsgrößen** vorliegen, wurden entsprechende qualitative Definitionen pro Bewertungsstufe formuliert.

Bei einer Nutzwertanalyse sollte ein solches Punktwertsystem ausreichend differenziert und nachvollziehbar sein (Pfohl 2018). Aus diesem Grund wurden für jedes Kriterium zunächst **vier Bewertungsstufen definiert**. Bei einigen der Kriterien waren sinnvollerweise aber nur zwei oder drei Bewertungsstufen notwendig, z.B. bei binären Entscheidungen. Die **unterste Bewertungsstufe** ist immer mit der Vergabe eines Punktwerts von 0 Punkten belegt, was impliziert, dass eine Ausstattung des Streckenelements in Bezug auf das betrachtete Bewertungskriterium nicht möglich ist. Dagegen bedeutet das Erreichen der **obersten Bewertungsstufe** einen Wert von 3 Punkten, also eine Ausstattung des Streckenelements ohne Einschränkungen hinsichtlich dieses Kriteriums. Die beiden **mittleren Bewertungsstufen** spiegeln einen geringen bzw. einen hohen zu erwartenden Mehraufwand gegenüber einer Ausstattung ohne Einschränkungen wider. Sie sind mit einem zu vergebenden Punktwert von 1 Punkt bei zu erwartendem, hohem Mehraufwand und 2 Punkten bei zu erwartendem, geringem Mehraufwand verbunden.

Die einzelnen Bewertungskriterien können im Rahmen der Nutzwertanalyse untereinander in Abhängigkeit ihres Beitrags zu einem Zielsystem untereinander gewichtet werden, wodurch Teilnutzwerte je Kriterium entstehen. Da hier eine Anwendung des Verfahrensteils aussteht, konnte somit eine empirische Ermittlung der **Gewichtung der Bewertungskriterien** bisher nicht erfolgen. In weiteren Forschungsvorhaben könnten die Gewichtungen der Kriterien auf Grundlage der gesammelten Erfahrungen in den drei deutschen *eHighway*-Feldversuchen oder einer Auswertung der Feldversuche in anderen Ländern für weitere Systeme jedoch mittels eines *Analytical Hierarchy Process* ermittelt werden (Schaub 2007).

Wie im Rahmen des Verkehrsplanungsprozesses sinnvollerweise vorgesehen, sollte nun zunächst eine wertfreie **Wirkungsermittlung** für jedes Bewertungskriterium erfolgen, die die für jedes Kriterium definierten zu bewertenden Größen erfasst. Dies erfolgt allerdings nur, wenn das jeweils betrachtete Kriterium auch für das zu bewertende System zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt einschlägig ist. Die Kriterien werden anschließend mittels des definierten Punktwertsystems **bewertet**. Hierbei erfolgt ein **Vergleich der erkannten Wirkungen** eines jeden Streckenelements auf der einen Seite mit den innerhalb der Bewertungsstufen **festgelegten Entscheidungsregeln zur Vergabe von Punktwerten** auf der anderen Seite.

Unter Einbeziehung der Gewichtungen kann nun ein **gewichteter Teilnutzwert je Kriterium** berechnet werden, indem die ermittelten Punktwerte mit dem jeweiligen Kriteriengewicht multipliziert werden. Durch Summenbildung über alle Teilnutzwerte kann abschließend ein **Gesamt-Nutzwert** für jedes Streckenelement ermittelt werden. Sollte hierbei die Vergabe eines **Teilnutzwerts von 0 Punkten** bei einem der Kriterien festgestellt werden, wird auch die **Gesamtbewertung auf diesen Wert reduziert**, somit ist eine **Ausstattung dieses Streckenelements nicht möglich**.

---

Dieses Vorgehen lässt sich auch **formal beschreiben**. Für jedes **Streckenelement**  $s$  wird hinsichtlich jedes Kriteriums  $z$  auf Basis der Entscheidungsregeln detektiert, welcher **Punktwert**  $n_{sz}$  zugeordnet werden kann. Dieser Punktwert  $n_{sz}$  wird außerdem mit dem **Gewicht des Kriteriums**  $g_z$  multipliziert. Über alle Kriterien hinweg ergibt sich dann ein **gesamter Nutzwert**  $N_s$  als Summe der Teilnutzwerte. Die Bewertung der Streckenelemente in dieser Methode erfolgt gemäß der folgenden Formel:

$$N_s = \sum_{z=1}^r n_{sz} * g_z \quad (5-1)$$

u.d.N.:

$$\sum_{z=1}^r g_z = 1$$

$$\{n_{sz} | n_{sz} = 0\} \Rightarrow N_s = 0$$

Variablenbeschreibung:

$s$	Streckenelement
$z$	Bewertungskriterium
$g_z$	Gewichtungsfaktor des Kriteriums $z$
$n_{sz}$	Punktwert des Streckenelements $s$ in Bezug auf Kriterium $z$
$N_s$	Nutzwert des Streckenelements $s$

Formel 5-1: Ermittlungsvorschrift des gewichteten Gesamtnutzwerts  
(Quelle: eigene Darstellung).

Nach Abschluss der **Bewertung der Streckenelemente** wurde jedem **Streckenelement** ein **Nutzwert** zugewiesen und es wurden diejenigen **Streckenelemente identifiziert**, die **nicht ausgestattet** werden können. Auf dieser Basis können die Streckenelemente nun zu **Streckenabschnitten** zusammengefasst werden.

#### 5.4.2.3. Bewertung von Streckenabschnitten

Die ausgestattete Streckenlänge, die durch ein Unterwerk (meist in beide Fahrtrichtungen) versorgt werden kann, wird als **Einspeiseabschnitt** bezeichnet. Ein Einspeiseabschnitt sollte aus praktischen Erwägungen komplett aus ausstattbaren Streckenelementen bestehen, Unterbrechungen sind aber möglich. Unter **Einbeziehung** der zu erwartenden **Verkehrsnachfrage** einerseits sowie der gewählten **elektrotechnischen Konfiguration** (z.B. Spannung, Dauerleistung) des unterstellten Systems andererseits ergeben sich die **Anzahl der Einspeiseabschnitte** und damit auch die **Anzahl der Unterwerke** in der jeweils betrachteten **Teilstrecke**. **Unterwerke** haben in diesem Kontext die Aufgabe, den **Lade- und Traktionsstrom** für Systeme zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt aus dem öffentlichen Stromnetz (oder perspektivisch auch aus dem Hochspannungs-Bahnstromnetz) für das jeweilige System passend zu **wandeln und bereitzustellen**. Idealerweise sollte ein **Streckenabschnitt** einem **Einspeiseabschnitt** entsprechen.

Zur Ableitung dieser **Streckenabschnitte aus den bewerteten Streckenelementen** gibt es mehrere mögliche Vorgehensweisen. Zum Ersten können verfahrensexogen auf Basis der **Regel-Unterwerksabstände** für das jeweils unterstellte System zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt entsprechend lange Streckenabschnitte vorgegeben werden. Zum Zweiten können die **nicht ausstattbaren Streckenelemente** gewissermaßen als natürliche **Grenzen** von Streckenabschnitten herangezogen werden und Streckenabschnitte werden somit verfahrensendogen festgelegt. Zum Dritten können sie auf Basis **existierender, potentieller Unterwerksstandorte** abgeleitet werden. In aller Regel muss jedoch auf die lokale planerische Erfahrung zurückgegriffen werden, die im Rahmen des Verkehrsplanungsprozesses in der Praxis häufig gefragt ist.

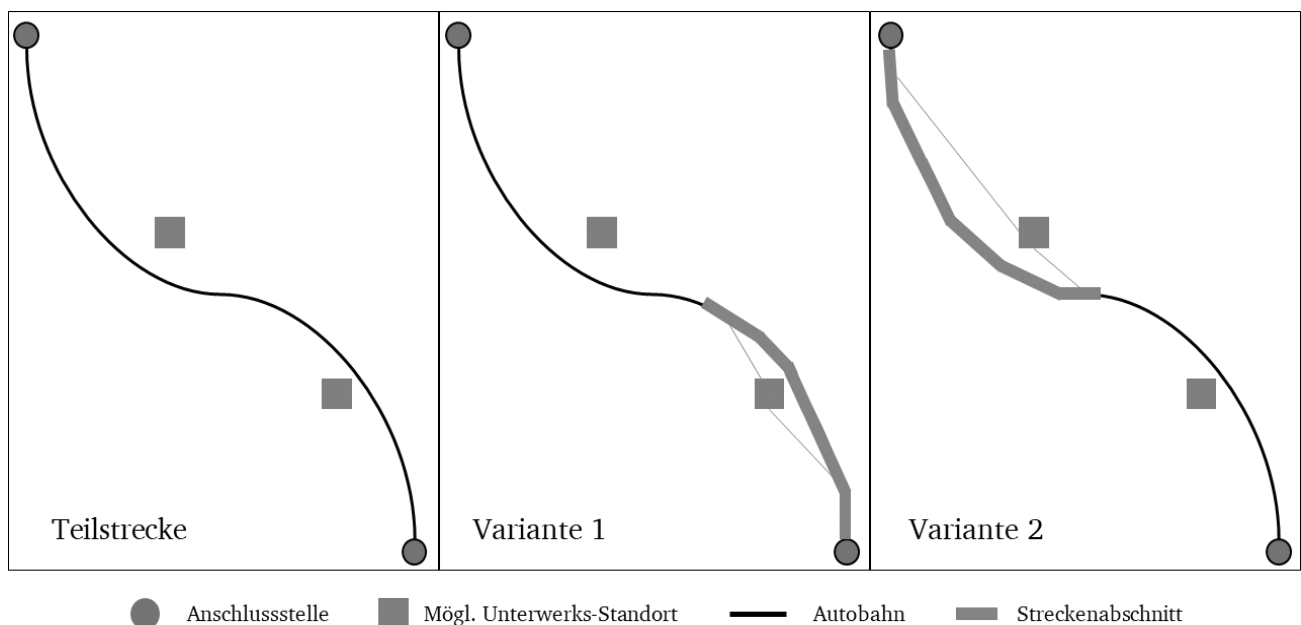


Abbildung 5-10: Anordnungsmöglichkeiten eines Streckenabschnitts in einer Teilstrecke  
(Quelle: eigene Darstellung).

Bedingt durch dieses Vorgehen entstehen in der Regel mehrere **Varianten der Anordnung von Streckenabschnitten** innerhalb einer Teilstrecke, wie in Abbildung 5-10 illustriert worden ist. In diesem Beispiel soll innerhalb der betrachteten Teilstrecke, die durch zwei Anschlussstellen begrenzt ist, ein einzelner **Einspeiseabschnitt bzw. ein Streckenabschnitt** untergebracht werden (linker Teil der Abbildung). Hierzu sind zwei unterschiedliche potentielle Unterwerksstandorte identifiziert worden, es gibt also zwei verschiedene Anordnungsvarianten. Auf Basis dieser Streckenabschnitts-Varianten kann nun eine Bewertung der Streckenabschnitte aus bautechnischer Sicht erfolgen und aus den beiden Varianten sollte die vorteilhafteste Variante im Hinblick auf die generierten Nutzwerte gewählt werden. Sollten **potentielle Unterwerksstandorte ex ante unbekannt** sein, sind diese im Zuge der Aggregation der Streckenelemente zu Streckenabschnitten auf Basis deren Dimensionierung für das jeweils unterstellte System zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt zu ermitteln.

Nach der Festlegung potentieller Streckenabschnitte ist in diesem Verfahren anschließend deren **Bewertung** vorgesehen. Wie auf der Ebene der Streckenelemente auch, sind nur einige Bewertungskriterien in Abhängigkeit des jeweils unterstellten Systems zur Energieversorgung von Lkw

während der Fahrt einschlägig. Eine Übersicht der Bewertungskriterien nach Kategorie mit den entsprechenden Bewertungsstufen gibt Abbildung 5-11.

Das **Vorgehen bei der Bewertung** entspricht dem für Streckenelemente: auf Basis der Bewertungsstufen erfolgt eine Zuordnung von Teilnutzwerten, die unter Beachtung von Teilnutzwerten mit einem Wert von 0 summiert werden. Hierdurch erhalten die vorab bestimmten Streckenabschnitte einen Nutzwert und die Anordnungsalternative mit dem höchsten Nutzwert sollte gewählt werden. Gegebenenfalls sollten ergänzende, qualitative Bewertungen vorgenommen werden.

Krit.-Nr.	Ebene	Bewertungskriterien	Ausstattung nicht möglich	Ausstattung mit hohem Mehraufwand möglich	Ausstattung mit geringem Mehraufwand möglich	Ausstattung ohne Mehraufwand möglich
		Teilnutzwert	0	1	2	3
Planungsrechtliche Eigenschaften						
SA-1	SA	Raumordnungsverfahren	-	Negative Beurteilung	Positive Beurteilung mit Maßnahmen	Positive Beurteilung
SA-2	SA	Umweltverträglichkeitsprüfung	-	UVP notwendig	-	Keine UVP notwendig
SA-3	SA	Planfeststellungsverfahren	-	Planfeststellungs- verfahren	Plangenehmigungs- verfahren	Verzicht auf ein PFV
SA-4	SA	Bundesverkehrswegeplan	Ausbauvorhaben geplant	-	-	Keine Ausbauvorhaben geplant
SA-5	SA	Grundeigentum	-	Eigentümer der Fläche Privat	Eigentümer der Fläche Land	Eigentümer der Fläche Bund
Eigenschaften der Flächen- und Bodenbeschaffenheit						
SA-13	SA	Bodenbeschaffenheit	-	Es liegt kein Bodengutachten vor	-	Es liegt ein Bodengutachten vor
SA-14	SA	Höhenprofil	-	-	Steigung	Flaches Gelände, Gefälle
Eigenschaften im Hinblick auf das elektrische Schutzkonzept						
SA-24	SA	Energieversorgung	-	Entfernung zu Freileitungen/ Erdkabeln > 3000 m	500m >Entfernung zu Freileitungen/ Erdkabeln <3000 m	Entfernung zu Freileitungen/ Erdkabeln < 500 m
SA-26	SA	Standorte für Unterwerke	Fläche kann nicht bereitgestellt werden	Fläche kann zu hohen Kosten ermöglicht werden	Fläche kann zu geringen Kosten ermöglicht werden	Fläche steht zur Verfügung
Bau- und Straßenbetriebliche Eigenschaften						
SA-27	SA	Baubetrieb	-	-	Alle anderen RQ	RQ 35,5 & 36
SA-28	SA	Sichtbarkeit der vorhandenen Beschilderung	-	-	Verdeckungs- wahrscheinlichkeit hoch, da Rechtskurve oder Damm-lage	Verdeckungs- wahrscheinlichkeit gering, da Gerade/ Linkskurve oder

Legende: SA: Streckenabschnitt

Erläuterungen: \* Minimale Distanz (Luftlinie)

Abbildung 5-11: Bewertungskriterien für Streckenabschnitte mit Bewertungsstufen  
(Quelle: eigene Darstellung).



---

Hinsichtlich der relevanten **Bewertungskriterien** sind vor allem **planungsrechtliche Eigenschaften** zu bewerten, die in der **Phase der Planung und Genehmigung** einer Ladestation relevant werden. Zudem sollten für Streckenabschnitte bestimmte **Eigenschaften der Flächen- und Bodenbeschaffenheit** bewertet werden, z.B. die Ergebnisse eines Bodengutachtens oder die Bewertung des Höhenprofils. Zudem kommt der Bewertung unterschiedlicher **Unterwerksstandorte** aus Kostengesichtspunkten auf Ebene der Streckenabschnitte eine besondere Rolle zu. In diesem Kontext ist auch die Energieversorgung in Form der Distanz zum nächstgelegenen Mittelspannungsanschluss, von einem bestimmten Unterwerksstandort ausgehend, zu bewerten. Schließlich sollten **bau- und straßenbetriebliche Eigenschaften von Streckenabschnitten**, wie zum Beispiel die Sichtbarkeit der Beschilderung (besonders wichtig bei Oberleitungen), bewertet werden.

---



---

## 5.5. Verfahrensteil Güterverkehrsnachfrage

Der Verfahrensteil Güterverkehrsnachfrage hat die Bereitstellung der Datengrundlage für den Verfahrensteil *Lageermittlung* in Form einer **Stichprobe von Relationen** zur Aufgabe. Eine Relation bezeichnet in diesem Kontext, wie bereits erwähnt, eine gerichtete Knotenbeziehung mit bestimmten Attributen, wie z.B. dem Fahrtenaufkommen eines bestimmten Zeitraums.

Notwendigerweise hängt das Vorgehen zur Ableitung einer solchen **Relationenstichprobe** hier also stark vom jeweiligen Anwendungsfall und den zur Verfügung stehenden Daten zur Modellierung der Güterverkehrsnachfrage ab. Aus diesem Grund wird der Verfahrensteil nur schlaglichtartig beleuchtet und eher aus Sicht des zu erzielenden Ergebnisses beschrieben, um eine Anschlussfähigkeit zu den anderen Verfahrensteilen zu gewährleisten.

Eine **Verflechtungsmatrix** der Verkehrsnachfrage für das jeweilige Untersuchungsgebiet ist eine notwendige Voraussetzung zu Generierung der für diese Verfahren notwendigen Datengrundlage. Für die nationale Ebene der Bundesrepublik Deutschland eignet sich zu diesem Zweck zum Beispiel die jeweils aktuellste Verflechtungsmatrix der Bundesverkehrswegeplanung (BVWP-Matrix) oder Sonderauswertungen der Güterkraftverkehrsstatistik, die beim Kraftfahrt-Bundesamt bezogen werden können (siehe auch Abschnitt 2.2.1). Aus diesen und weiteren Daten lässt sich unter Anwendung des Instrumentariums der **Güterverkehrsnachfragemodellierung** auch eine solche Verflechtungsmatrix erzeugen, falls diese nicht vorliegen sollte (siehe z.B. Reiche 2018; Friedrich 2010; Ben-Akiva und de Jong 2013 oder Liedtke und Friedrich 2012).

Falls die verfügbare (d.h. in diesem Fall öffentlich zugängliche) **Verflechtungsmatrix**, wie im Falle der BVWP-Matrix, lediglich auf **Güter- und nicht auf Fahrzeugflüsse** zwischen den Raumeinheiten aufgelöst ist, muss in einigen **Umwandlungsschritten** eine **fahrzeugbasierte Matrix** bzw. eine Fahrtenliste erzeugt werden. Hinsichtlich der räumlichen Aggregationstiefe muss die Fahrtenliste überdies räumlich auf Ebene von **Netzeinspeiseknoten** aufgelöst sein.

Liegt die Verkehrsnachfrage schlussendlich auf Ebene der Knotenbeziehungen vor, können daraus mit geeigneten Methoden entsprechende Stichproben gezogen bzw. generiert werden (Quatember 2014; Döring und Bortz 2016, S. 393-487). Es bietet sich in diesem Zusammenhang an, die gesamte Datengrundlage zunächst derart aufzubereiten, dass sie mit **externen Quellen vergleichbar** gemacht werden kann. Für Deutschland wäre dies z.B. die Reihe VD der Güterkraftverkehrsstatistik (Kraftfahrt-Bundesamt 2014). Hierdurch wird eine **Schichtung der Stichprobe** möglich, die die strukturelle Repräsentativität der Zufallsstichprobe gegenüber der Grundgesamtheit gewährleistet (sog. *stratified random sampling* oder stratifizierte Zufallsstichprobe). Zudem kann der benötigte **Mindestumfang der Stichprobe** rechnerisch bestimmt werden.

Im Ergebnis kann die generierte **Relationenstichprobe** im einfachsten Fall auf einen **mittleren, repräsentativen Fahrzeugtypen** abstellen, das Verfahren erlaubt aber auch eine weitergehende Disaggregation, z.B. eine Unterscheidung verschiedener Lkw-Typen und damit unterschiedlicher Emissions- oder Verbrauchskennwerte, indem die Relationenstichprobe entsprechend angepasst wird.

## 5.6. Verfahrensteil Lageermittlung

### 5.6.1. Überblick

Der Verfahrensteil *Lageermittlung* ist der **Kern des hier vorgestellten Lösungsverfahrens**. Den **grundlegenden Aufbau** des Verfahrens zeigt Abbildung 5-12. Das Verfahren beruht aus methodischer Sicht auf einer **hierarchischen Kopplung** eines **Simulationsmodells**, das von einem **Optimierungsmodell** über eine **Metaheuristik** gesteuert wird. Das Verfahren ist unabhängig von einer konkreten Simulationsumgebung einsetzbar. Die verwendete Simulationsumgebung muss aber in der Lage sein, die hier beschriebenen Modellschritte entsprechend abbilden zu können. Zudem wird eine beliebige Datenbankschnittstelle benötigt. Wegen seiner vielseitigen Einsatzfähigkeit und seiner besonderen Eignung für die simulationsbasierte Optimierungsexperimente wird das **Scatter Search-Verfahren** zur Verwendung empfohlen (Glover *et al.* 1999; Martí *et al.* 2018; Egea *et al.* 2009; Martí *et al.* 2015; Zhang *et al.* 2012).<sup>34</sup>

Tabelle 5-2: Übersicht möglicher Parameter in einem Simulationsexperiment  
(Quelle: eigene Darstellung).

Bezeichnung	Einheit	Bezugsobjekt	Optimierungsvariable
Notwendige Parameter			
Verbrauch Dieselmodus	l/km	Fahrzeug	nein
Verbrauch Stationsmodus	kWh/km	Fahrzeug	nein
Verbrauch Batteriemodus	kWh/km	Fahrzeug	nein
Emissionen Diesel	g/l	Fahrzeug	nein
Emissionen Strom	g/kWh	Fahrzeug	nein
Max. Batteriekapazität (netto)	kWh	Fahrzeug	nein
Distanz Vorlauf	km	Fahrzeug	nein
Norm-Länge	km	Ladestation	nein
Ladeleistung	kWh/min	Ladestation	nein
Max. simultane Fahrzeuganzahl	Fz	Ladestation	nein
Stationstyp	-	Ladestation	nein
Kosten Streckenausstattung	Mio. EUR/km	Ladestation	nein
Ausbaubudget	Mio. EUR	Verfahren	nein
Anzahl Relationen	-	Verfahren	nein
Abarbeitungsreihenfolge der Relationen	-	Verfahren	ja
Optionale Parameter			
Kostensatz CO <sub>2</sub>	EUR/t	Verfahren	nein
Kostensatz Diesel	EUR/l	Verfahren	nein
Kostensatz Strom	EUR/kWh	Verfahren	nein

<sup>34</sup> Das Scatter Search-Verfahren wird aus diesem Grunde in der Optimierungssoftware *OptQuest* verwendet, die als Software-Service in einigen der in der Praxis am häufigsten zum Einsatz kommenden Simulationsumgebungen implementiert ist. *OptQuest* wird daher auch im Rahmen der technischen Umsetzung des hier beschriebenen Verfahrens verwendet (siehe Anhang 3)

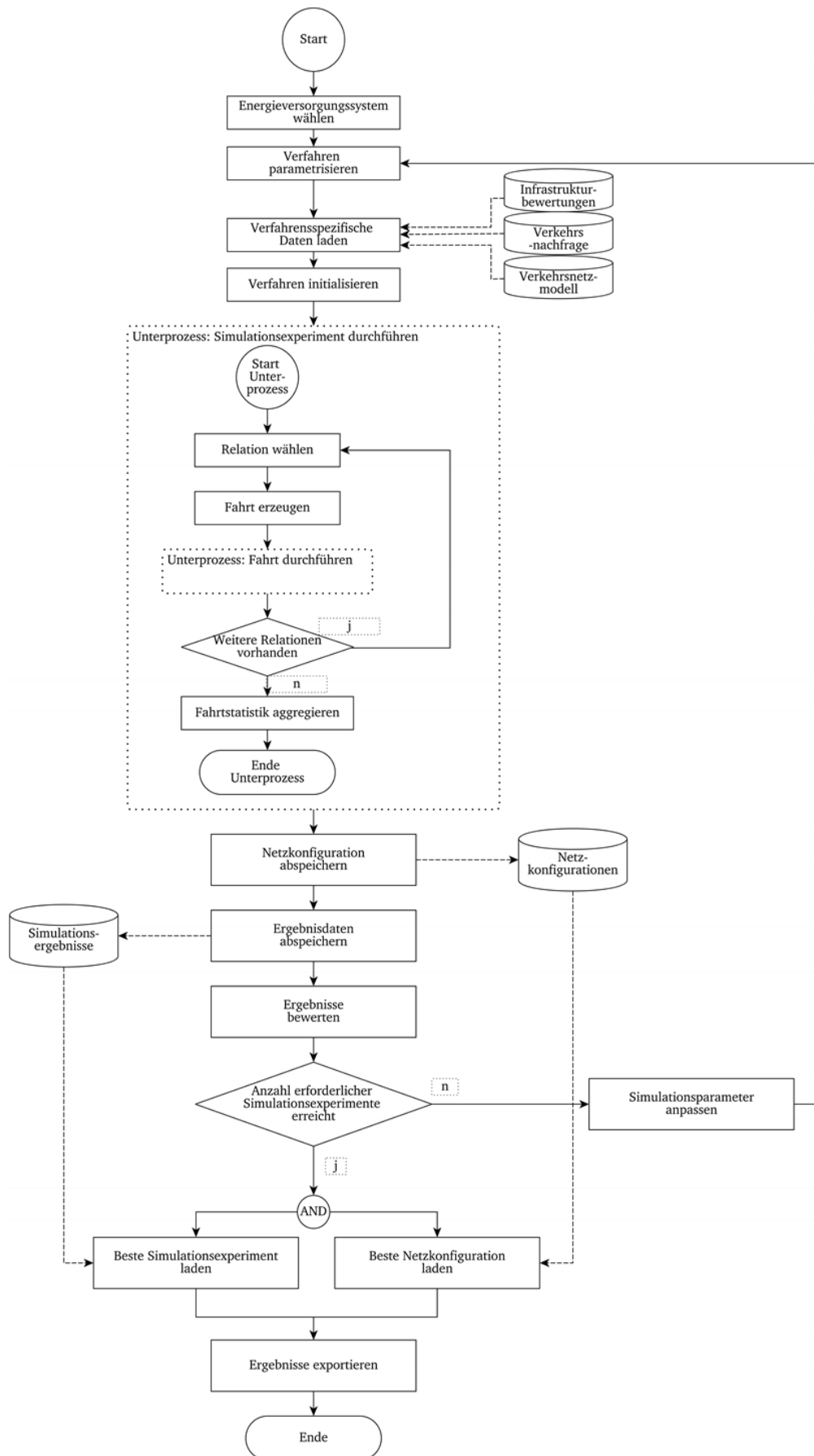


Abbildung 5-12: Aufbau des gekoppelten Simulations- und Optimierungsmodells im Rahmen des Verfahrensteils Lagermittlung (Quelle: eigene Darstellung).

---

Zunächst wird in einem ersten Schritt das im Verfahrensteil zu unterstellende **Energieversorgungssystem ausgewählt**. Dieses System wird durch eine Reihe von Parametern charakterisiert, die in einem nächsten Schritt zusammen mit weiteren **maßgeblichen Einstellungen vorgenommen werden**. Eine Übersicht der Parameter zeigt Tabelle 5-2. Die Parameter umfassen zum Ersten **Kennwerte zur elektrotechnischen Konfiguration** des jeweils zugrundeliegenden Systems zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt (z.B. die Ladeleistung pro Minute oder die Ausstattungskosten je Kilometer). Zum Zweiten müssen **fahrzeugseitige Auslegungsparameter** wie bspw. die Kapazität des mitgeführten Energiespeichers festgelegt werden. Zum Dritten werden Parameter, die sich generell auf den jeweiligen **Anwendungsfall** auf Ebene des Verfahrens definiert werden, z.B. die Anzahl der zu berücksichtigenden Relationen sowie deren Abarbeitungsreihenfolge.

Nach Abschluss der Parametrisierung wird in einem zweiten Verfahrensschritt zunächst die **verfahrensspezifischen Datengrundlage geladen und aufbereitet**. Die Datenbasis, aus praktischen Erwägungen sicherlich in den meisten Fällen mehrere Datenbanken, besteht aus drei Komponenten: der **Verkehrsnachfrage** auf Ebene der Knotenbeziehungen, den **Ergebnissen** der ex ante durchgeführten **Infrastrukturbewertung** auf Ebene der Streckenelemente (inklusive deren Einteilungsregeln) sowie einem **Verkehrsnetzmodell**. Anmerkungen aus einer implementierungsorientierten Perspektive hierzu finden sich in Anhang 3.

Daran anknüpfend wird in einem dritten Verfahrensschritt ein **Simulationsexperiment** auf Basis der vorgenommenen Einstellungen **initialisiert**, d.h. es werden zum Beispiel einige **datenbezogene Konsistenzprüfungen** durchgeführt, das **Verkehrsnetzmodell** wird mit den **Infrastrukturbewertungen** attribuiert, oder eine **Bestwegsuche für die Relationen** wird durchgeführt. Dieser Schritt hängt insgesamt aber sehr von der jeweiligen Ausgestaltung als Software ab (siehe Anhang 3 für ein Beispiel).

Im vierten Verfahrensschritt wird nun das **Simulationsexperiment durchgeführt**, was hier als eigener Unterprozess modelliert ist, da ein klares Abbruchkriterium definiert werden kann, jedoch weitere Aufgaben danach nach Abschluss des Unterprozesses anfallen. Kurz zusammengefasst werden Fahrtverläufe auf Basis des Verkehrsnetzmodells nachgebildet, bei Bedarf und bei Erfüllung aller infrastrukturseitigen Voraussetzungen werden einzelne Streckenelemente mit Ladestations-Elementen des jeweils unterstellten Energieversorgungssystems versehen und so die Fahrzeugladung ermöglicht. Im Ergebnis entsteht nach jedem Simulationsexperiment also eine Netzwerkkonfiguration, die hinsichtlich einer Zielfunktion bewertet werden kann. Der Ablauf eines solchen Simulationsexperiments wird detaillierter in **Abschnitt 5.6.3** erläutert.

Nach Abschluss des Unterprozesses *Simulationsexperiment durchführen* werden nun in zwei weiteren Schritten die gerade erzeugte **Netzkonfiguration** einerseits sowie andererseits **Kenngrößen**, die mit dem Simulationsexperiment verbunden sind, als Ergebnisse **gespeichert**. Hierzu bietet sich die Einrichtung einer Datenbankschnittstelle an (siehe Anhang 3).

Anschließend werden die Ergebnisse durch die **Optimierungskomponente** des gekoppelten Modells **bewertet**. Hierbei wird auf die jeweils resultierenden Werte einer Zielfunktion bzw. der Variablen zur Beschreibung der Nebenbedingungen zurückgegriffen. Erläuternde Ausführungen hierzu finden sich in Abschnitt 5.6.2. Die steuernde Metaheuristik prüft außerdem, ob die **notwendige, vorab definierte Anzahl an Simulationsexperimenten** durchgeführt worden ist. Ist dies nicht der Fall, wird ein weiteres

---

---

Simulationsexperiment durchgeführt, indem zum Unterprozesses *Simulationsexperiment durchführen* gesprungen wird. Zur weiteren **Verbesserung der Zielfunktion** (d.h. der Netzkonfiguration) werden in diesem neuen Simulationsexperiment entweder die Reihenfolge der Relationsabarbeitung geändert oder die definierten Parameter variiert. Die Anzahl der notwendigen Simulationsexperimente sollte *ex ante* gemäß gängiger Qualitätskriterien **ermittelt werden** (Eley 2012, S. 29ff).

Wurde die Anzahl notwendiger Simulationsexperimente erreicht, werden die **Ergebnisse** jedes bisher durchgeführten Simulationsexperiments in einem letzten Schritt **dokumentiert** und die beste Lösung (d.h. das Simulationsexperiment mitsamt Ergebnissen sowie die ermittelte Netzkonfiguration) zwischengespeichert. In einem letzten Schritt werden die Ergebnisse exportiert, sodass die Daten zur verfahrensexternen Auswertung bereitstehen.

## 5.6.2. Ablauf eines Simulationsexperiments

Der Unterprozess *Simulationsexperiment durchführen* hat innerhalb des Verfahrensteils **Lageermittlung** die Aufgabe, den Ablauf eines **einzelnen Simulationsexperiments zu steuern**. Damit bildet er das Kernstück des Verfahrensteils und einige weitere notwendige Prozesse zur Fahrtensteuerung und dem Lademanagement laufen in seinem Rahmen ab. Eine Übersicht des Prozesses zeigt Abbildung 5-13.

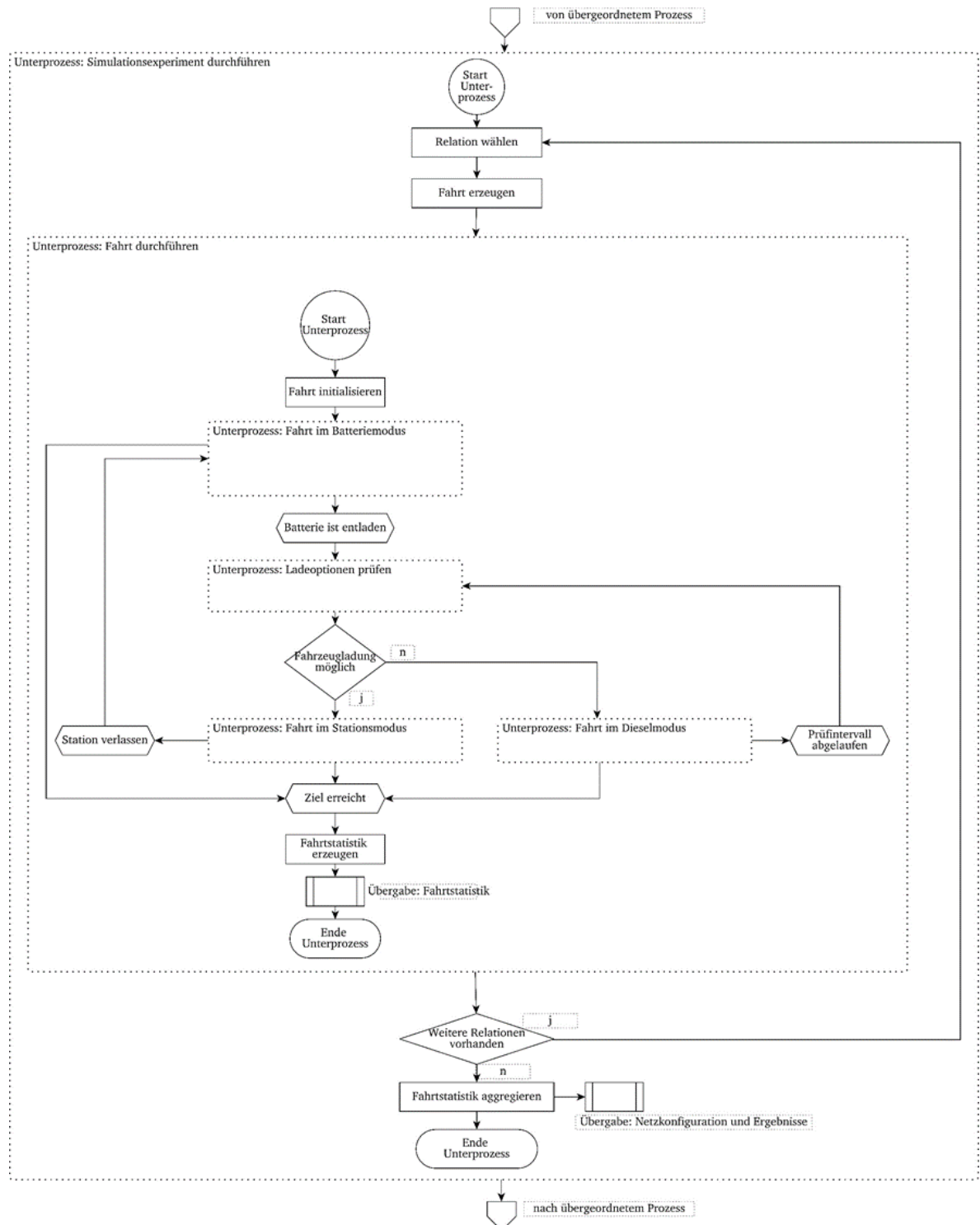


Abbildung 5-13: Unterprozess Simulationsexperiment durchführen  
(Quelle: eigene Darstellung).

---

In einem ersten Prozessschritt wird eine **Relation** aus der Relationsstichprobe nach vorgegebenem Muster ausgewählt. Dazu können z.B. bestimmte **statistische Verfahren** zur Ziehung von Zufallsstichproben oder ein **regelbasiertes Vorgehen** (z.B. auf- bzw. absteigende Sortierung der Relationen nach Verkehrsaufkommen) zum Einsatz kommen. Im Modell OAASEE werden die Relationen der Stichprobe z.B. zufällig gezogen, andere Einstellungen können jedoch vorgenommen werden.

Auf Basis der jeweils gewählten Relation wird in einem weiteren Schritt eine fiktive **Fahrt zwischen dem Quell- und dem Ziel-Knoten** der Relation erzeugt. Solche Knoten können, wie erwähnt, je nach verwendeter Datengrundlage z.B. Autobahn-Anschlussstellen oder geometrische Zentren von Verkehrszellen sein. Jede Fahrt ist mit dem jeweils aus der QZ-Matrix entnommenen Verkehrsaufkommen (Lkw pro Jahr) versehen, so dass implizit eine Gewichtung in Bezug auf das gesamte Fahrtenaufkommen entsteht. Zudem kann bei Vorliegen einer entsprechenden Datengrundlage und bei bestehendem Untersuchungsbedarf an dieser Stelle auch noch eine weitergehende zeitliche Disaggregation erfolgen (z.B. nach Betriebstagen des Güterverkehrs oder Zeitscheiben innerhalb eines Betriebstages).

Daran anknüpfend wird die erzeugte **Fahrt** als **virtuelle Fahrzeugbewegung** unter Nutzung des **Verkehrsnetzmodells** und unter Rückgriff auf die Ergebnisse der Infrastrukturbewertung auf Ebene der Streckenelemente im Simulationsmodell abgebildet. Dieser Prozess ist aus Gründen der Übersichtlichkeit in Abbildung 5-15 in einem separaten **Unterprozess Fahrt durchführen** verortet und wird daher in Abschnitt 5.6.3.1 eingehender beschrieben.

Im Rahmen der Simulation des Fahrtablaufs werden bei bestehendem Bedarf und bei Vorliegen der infrastrukturseitigen Voraussetzungen **Ladestationen** des jeweils unterstellten Systems zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt entlang der Streckenelemente *bottom-up* dort **errichtet**, wo dies die Infrastrukturbewertung der jeweils auszustattenden Streckenelemente auch zulässt. Zudem werden **Lade- und Entladevorgänge** des Energiespeichers abgebildet. Die Lageermittlung wird in Abschnitt 5.6.3.2 vertieft behandelt.

Wenn das Fahrzeug seinen Zielknoten erreicht hat, wird bei Vorhandensein weiterer Relationen, die noch nicht abgewickelt worden sind, eine **neue Relation gewählt** und eine weitere Fahrt abgebildet. Der **Unterprozess Simulationsexperiment durchführen** wird **beendet**, wenn **keine weiteren Relationen** mehr vorliegen, die nicht bereits verarbeitet worden sind.

Als **Ergebnis** liegt nach Beendigung jedes Simulationsexperiments eine mögliche Netzwerkconfiguration mit einem bestimmten Ausstattungsgrad der Autobahnen mit Systemkomponenten zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt vor. Zusätzlich werden die Fahrtverläufe aller Relationen zu einer Fahrtstatistik für das Simulationsexperiment aggregiert und daraus die Ergebnisse erzeugt. Wie bereits einleitend beschrieben, werden die Werte daraus an die Metaheuristik weitergeleitet, die diese bewertet und über weitere Schritte befindet.



---

#### 5.6.2.1. Unterprozess Fahrt durchführen

Nachdem im übergeordneten Prozess *Simulationsexperiment durchführen* aus einer Relation eine virtuelle Fahrt erzeugt worden ist, wird im **Unterprozess Fahrt durchführen deren Bewegung durch das Kanten- und Knotennetzwerk des Verkehrsnetzmodells** simuliert. Der Unterprozess *Fahrt durchführen* ist somit das zentrale Element der Simulationskomponente im hier vorgeschlagenen Lösungsverfahren, da auf Grundlage der Fahrzeugbewegungen die **Netzkonfigurationen** erzeugt werden. Eine Übersicht des Ablaufs des Unterprozesses *Fahrt durchführen* ist in Abbildung 5-14 dargestellt.

In einem ersten Schritt wird im Unterprozess *Fahrt durchführen* die **Kantenfolge** des zugewiesenen Pfades zwischen den zwei zu verbindenden Knoten der Relation unter Rückgriff auf das **Verkehrsnetzmodell** ermittelt bzw. geladen. Auf dieser Basis nimmt das **Fahrzeug** seine Fahrt vom **Quellknoten** beginnend auf und bewegt sich über jede dieser Kanten. Während der Bewegung werden Kenngrößen zur elektrischen bzw. zur Diesel-Fahrleistung sowie zu den vermiedenen bzw. tatsächlich ausgestoßenen CO<sub>2</sub>-Emissionen erfasst.

#### Batteriemodus

Eine Fahrt beginnt immer im **Batteriemodus** d.h. unter Rückgriff auf den Energiespeicher, der parallel zur Fahrzeugbewegung entladen wird (unter Berücksichtigung eines vorlaufbedingten Abschlages sowie des zulässigen Hubs). Auch hier wurde, wie für die anderen Modi auch, eine Unterprozess definiert, weil es feste Ein- und Ausgangsbedingungen hierfür gibt. Während der Fahrt im Batteriemodus werden die **elektrische Fahrleistung** bzw. die **vermiedenen und tatsächlichen Emissionen** erfasst.

In einem vorgegebenen Modellzeit-Intervall (derzeit z.B. sekundlich) wird im Batteriemodus geprüft, ob gerade eine bereits errichtete Ladestation befahren wird oder ob der Energiespeicher entladen ist (unter Berücksichtigung des Hubs).<sup>35</sup> Sofern eine der beiden Bedingungen erfüllt ist, pausiert die Simulationskomponente die Modellausführung kurz, um die zur **Verfügung stehenden Optionen hinsichtlich der Fahrzeugladung** auf Basis der bereits installierten Ladestationen, dem zur Verfügung stehenden Ausbaubudget sowie der Ergebnisse der Infrastrukturbewertung zu prüfen. Hierzu ist wiederum ein eigener **Unterprozess Ladeoptionen prüfen** modelliert worden, der in Abschnitt 5.6.3.2 eingehend vorgestellt wird. In jedem Fall wird der Batteriemodus bei Vorliegen einer der beiden Bedingungen verlassen.

---

<sup>35</sup> Das Modellzeit-Intervall sollte anwendungsfallspezifisch im Wege einer Abwägung ermittelt werden. Mit kleinerem Modellzeit-Intervall verbessert sich die u.a. die Genauigkeit der Lageermittlung von Stationen einerseits während andererseits die Laufzeit eines Simulationsexperiments zunimmt.

---

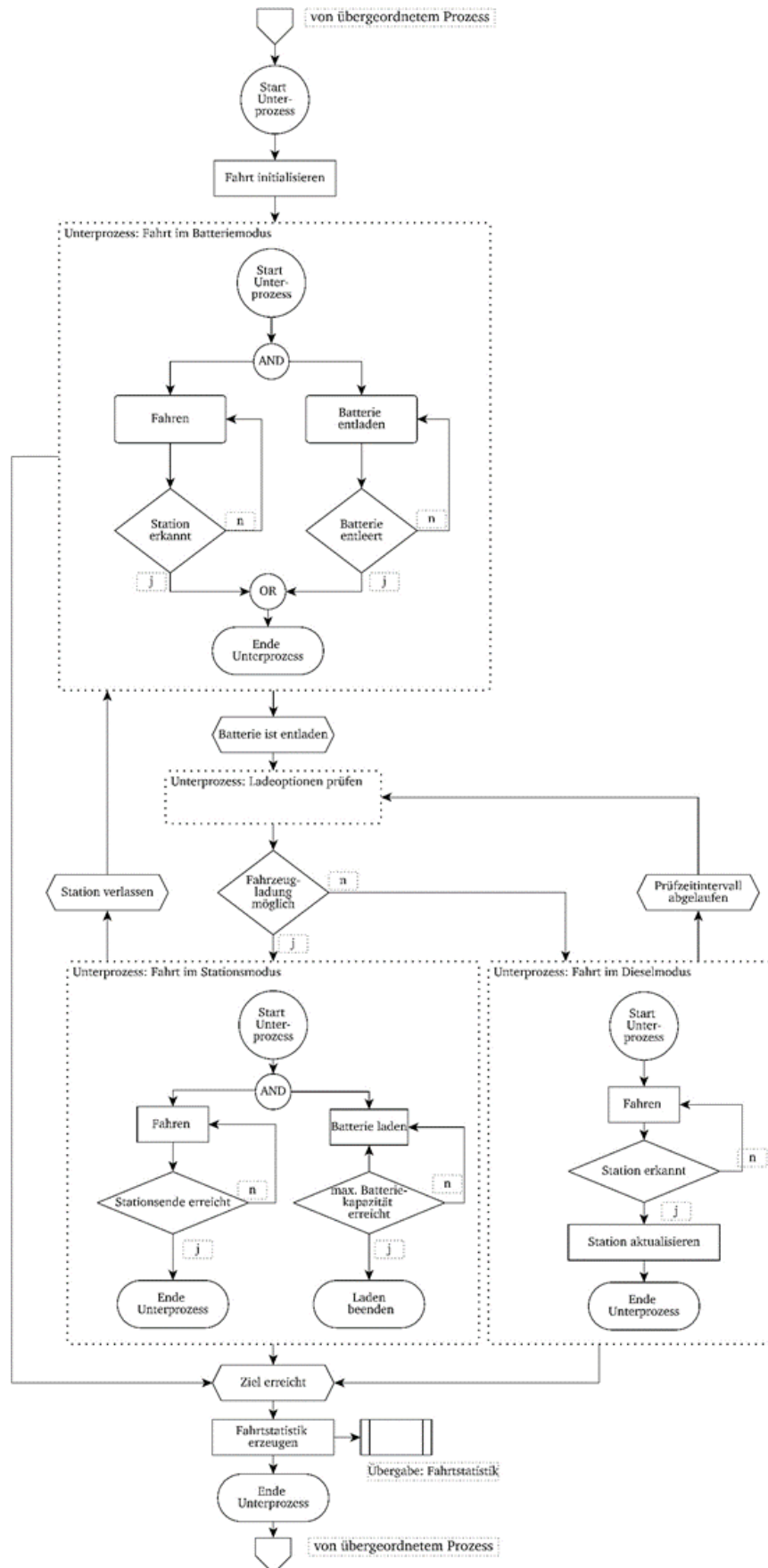


Abbildung 5-14: Ablauf des Unterprozesses „Fahrt durchführen“  
(Quelle: eigene Darstellung).

---

## Ladeoptionen prüfen

Der Unterprozess *Ladeoptionen prüfen* übermittelt nach dessen Abschluss eine **Aussage** darüber, ob auf der momentan durch das Fahrzeug befahrenen Kante eine **Lademöglichkeit** des unterstellten Energieversorgungssystem besteht oder nicht. Hier wird also entschieden, ob das Fahrzeug seine Fahrt im Diesel- oder dem Stationsmodus fortsetzt. Die vier disjunkten Ergebnisse des Unterprozesses sind:

1. Befahren einer existierenden Ladestation
2. Verlängern einer vorhandenen Ladestation zur aktuellen Position des Fahrzeugs
3. Neubau einer Ladestation
4. Feststellung, dass das Fahrzeug an der aktuellen Position nicht geladen werden kann

## Stationsmodus

Im Falle einer **existierenden Lademöglichkeit** (d.h. eine Ladestation existiert hier bereits bzw. eine Station kann verlängert oder neu gebaut werden) wird wechselt das Fahrzeug in den Stationsmodus und setzt seine Fahrt fort. Das Fahrzeug wird mittels des **Traktionsstroms** aus der Ladestation bewegt. Zudem wird der **Energiespeicher** unter Rückgriff auf den verbliebenen Anteil der elektrischen Dauerleistung **geladen**. Hierbei wird in einem vorgegebenen Modellzeit-Intervall geprüft, ob die **aktuelle Station noch befahren** wird oder ob diese bereits verlassen wurde. Ist dies der Fall, wird das Laden abgebrochen, der Ladestand des Energiespeichers ggf. wieder korrigiert und das Fahrzeug wechselt wieder in den **Batteriemodus**. Zudem wird für die bereits existierende Station geprüft, ob die derzeitige **elektrotechnische Auslegung noch ausreichend** für die vorhandene Verkehrsnachfrage ist, oder ob die nächsthöhere Ausbaustufe erreicht ist. Daneben wird das Verkehrsaufkommen der Station zugeschrieben um daraus die **elektrische Fahrleistung** bzw. die **vermiedenen und tatsächlichen Emissionen** zu berechnen. Sollte die maximale Kapazität des Energiespeichers durch die Fahrzeugladung erreicht sein, wird das Laden unterbrochen, das Fahrzeug verbleibt jedoch im Stationsmodus.

## Dieselmodus

Für den Fall, dass **keine Lademöglichkeit** an der aktuellen Position besteht, setzt das Fahrzeug die Fahrt im Dieselmodus fort. Auch hier wird sekundlich geprüft ob, wieder eine **Lademöglichkeit** besteht. Sollte dies der Fall sein, wird der Dieselmodus verlassen. Während der Fahrt im Dieselmodus werden außerdem die **Diesel-Fahrleistung** bzw. die **tatsächlichen Emissionen** erfasst.

Der Unterprozess *Fahrt durchführen* wird in der beschriebenen Weise solange fortgesetzt, bis der **Zielknoten erreicht** wird. Während des gesamten Prozesses werden in jedem Bewegungsmodus (d.h. Batterie, Diesel- oder Stationsmodus) die verursachten **Kohlenstoffdioxid-Emissionen** sowie die **Fahrleistung** (Diesel und elektrisch) erfasst. Diese lassen sich unmittelbar auf Grundlage der zurückgelegten Distanz des Referenzfahrzeuges und der dazu notwendigen, umgewandelten Energie errechnen. Die Gesamtheit der erfassten Kenngrößen wird hier als **Fahrtstatistik** bezeichnet, die für jede Relation gespeichert und übergeben wird.

---

### 5.6.2.2. Unterprozess Ladeoptionen prüfen

Der Unterprozess *Ladeoptionen prüfen* wird bei Bedarf im Rahmen des Unterprozesses *Fahrt durchführen* ausgelöst und sequentiell durchlaufen. Eine Übersicht des Prozessablaufs ist in Abbildung 5-15 grafisch dargestellt worden.

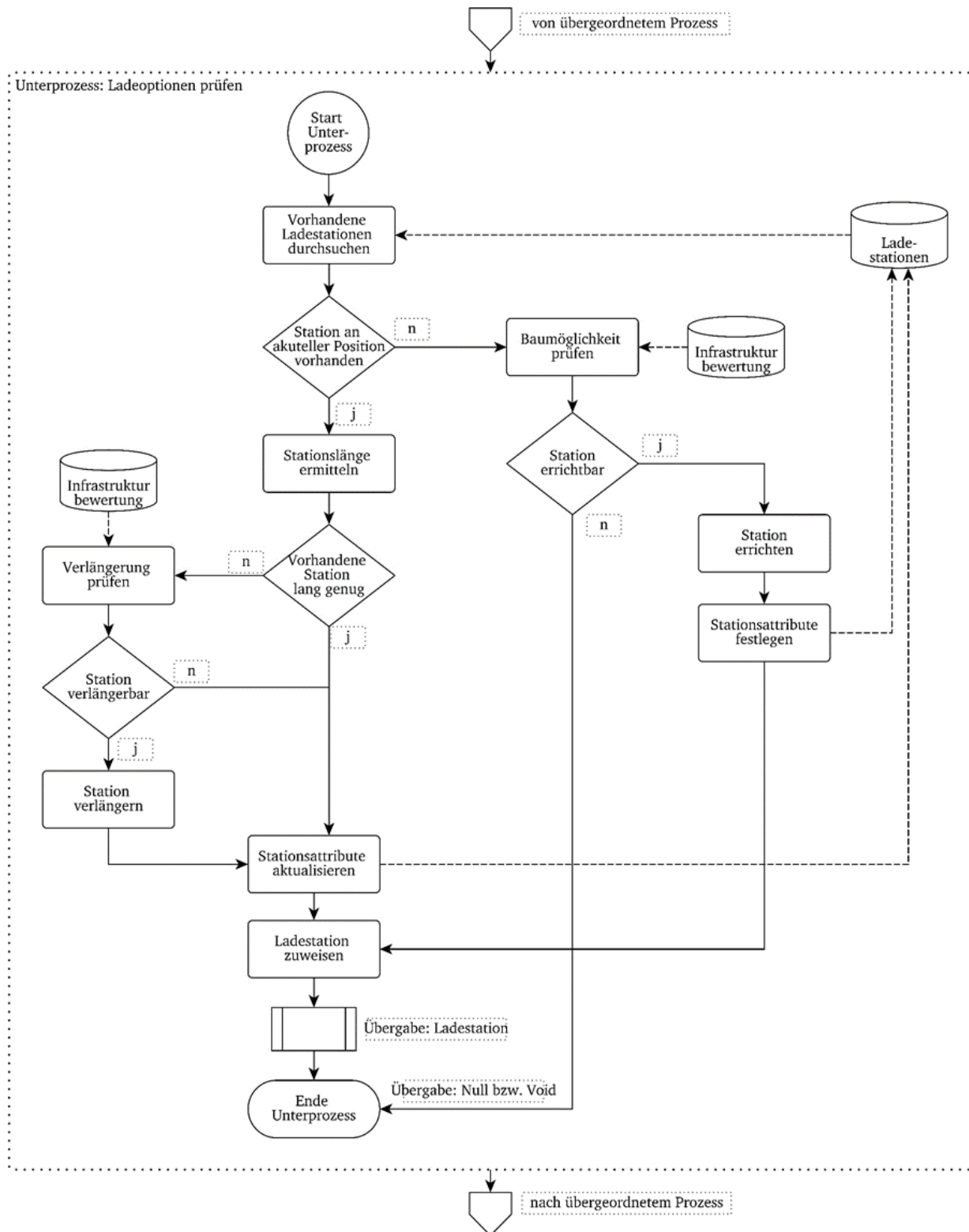


Abbildung 5-15: Ablauf des Prozesses „Ladeoptionen prüfen“  
(Quelle: eigene Darstellung).

---

In einem **ersten Schritt** werden alle im aktuellen Simulationsexperiment bereits errichteten **Ladestationen** dahingehend **überprüft**, ob die aktuelle **Position** des **Fahrzeuges** bzw. die Kante, auf der sich die Position befindet (über den Längen- bzw. Breitengrad) **Teil** einer **Ladestation** ist (Polygonzug). Ist dies der Fall, wird die zunächst die **Länge der Station** ermittelt, um aus der Länge und auf Basis der im Simulationsexperiment unterstellten Energiespeicherkapazität einerseits sowie der Dauerleistung der Station andererseits errechnen zu können, ob eine vollständige Ladung des Energiespeichers möglich ist oder nicht. Sollte zwar eine Ladestation gefunden worden sein, diese aber nicht lang genug sein, wird geprüft, ob eine **Verlängerung** dieser **Ladestation** möglich ist. Hierbei werden alle noch zu befahrenen Kanten auf dem Pfad des Fahrzeuges untersucht und eine Station ggf. in Fahrtrichtung verlängert. Zu dieser Prüfung wird neben der Infrastrukturbewertung auch das zur Verfügung stehende Budget herangezogen, das ggf. um die Ausbaurkosten reduziert wird.

In beiden Fällen werden die Eigenschaften der **aktuell befahrenen Ladestation aktualisiert**, indem Variablen wie z.B. die Verkehrsnachfrage der Station um das Verkehrsaufkommen der aktuellen Fahrt ergänzt wird. Werden hierbei bestimmte Schwellenwerte überschritten, wird die elektrotechnische Auslegung der jeweiligen Ladestation automatisch an das Verkehrsaufkommen angepasst, sofern dies das Kostenbudget zulässt. Dadurch können sich auch die Kostenparameter je Kilometer ändern. Nach erfolgter Aktualisierung wird im Ergebnis festgestellt, dass eine Fahrzeugladung möglich ist und der Prozess wird verlassen.

Wird hingegen im ersten Schritt keine Ladestation detektiert, wird geprüft, ob aus Sicht der Infrastrukturbewertung der Streckenelemente bzw. Kanten auf dem Pfad des Fahrzeuges ein **Neubau einer Ladestation** umsetzbar wäre. Dabei wird auch das restliche Ausbaubudget berücksichtigt. Ist ein Neubau möglich, wird eine neue Station in der jeweiligen Basis-Konfiguration des unterstellten Systems zur Energieversorgung in einer Länge errichtet, die eine vollständige Ladung des Energiespeichers ermöglicht. Zudem wird das Verkehrsaufkommen der aktuellen Fahrt als Basis-Verkehrsaufkommen verwendet. Außerdem werden die Errichtungskosten der Station bilanziert. Die Station wird dann dem Fahrzeug als aktuelle Ladestation zugewiesen und der Unterprozess wird verlassen.

Sollte an der aktuellen Position weder eine Ladestation gefunden werden noch die Verlängerung einer Ladestation bzw. deren Neubau möglich sein, wird als Ergebnis des Unterprozesses festgestellt, dass **keine Ladung** an der aktuellen Position möglich ist und der Prozess verlassen. Das Fahrzeug wechselt in diesem Fall also in den Dieselmodus.

---

---

### 5.6.3. Optimierungskomponente

Mit Hilfe der **Zielfunktion** soll in einem Optimierungsmodell diejenige **Entscheidungsalternative** gefunden werden, die der **Zielsetzung** des **Modellsubjekts am besten entspricht**. Dabei drücken die **Nebenbedingungen** bestimmte Restriktionen aus, die durch das Modellsubjekt eingehalten werden müssen. Sie **beschränken** somit den zulässigen **Entscheidungsraum** des Modellsubjekts. Im vorgeschlagenen Lösungsverfahren werden daher nach Abschluss eines Simulationsexperiments die ermittelte **Netzkonfiguration** sowie die begleitenden **Ergebnisse** an eine **Optimierungskomponente** weitergegeben. Neben der **Steuerung des Gesamtverfahrens** hat diese vor allem die Aufgabe, die jeweils vorliegende **Netzkonfiguration** vor dem Hintergrund einer **Zielfunktion** und bezüglich der Einhaltung bestimmter Nebenbedingungen zu **bewerten**.

Wie in Kapitel 5.1 beschrieben, stellt eine mögliche Zielsetzung in Bezug auf das hier vorgestellte Verfahren die **Maximierung der Emissionseinsparungen** gegenüber einem Vergleichsfall dar, der die Verwendung CO<sub>2</sub>-emittierender Antriebstechnologien (z.B. Dieselmotore) unterstellt. Verschiedene Energieversorgungssysteme weisen unterschiedliche Kostensätze je Streckenkilometer auf und können auf Basis abweichender WtW-Emissionskennwerte auch unterschiedlich hohe Kohlenstoffdioxid-Emissionseinsparungen generieren. Neben der Einhaltung weiterer Bedingungen darf also vor allem eine bestimmte budgetäre Grenze nicht überschritten werden. Die **Zielfunktion** sowie die **entsprechenden Nebenbedingungen** für den beschriebenen Fall werden im Folgenden abgeleitet.

Ein erster Ausgangspunkt der formalen Beschreibung des Problems ist ein **Verkehrsnetzmodell**. Für das in Kapitel 6 untersuchte Beispiel ist das ein Modell der deutschen Bundesautobahnen, die um weitere Abschnitte des Bundesstraßennetzes ergänzt worden sind. Aus Sicht der Graphentheorie können diese durch einen Graphen bestehend aus verschiedenen Straßen-Netzabschnitten (**Kanten**) sowie Anschlussstellen, Autobahnkreuzen und Autobahndreiecken oder Grenzübergangspunkten (**Knoten**) repräsentiert werden. Knoten, an den Fahrten beginnen oder enden können, werden neutral als **Netzeinspeiseknoten** bezeichnet, von ihnen zu unterscheiden sind **Routenknoten**, die nur befahren werden können. Dazu werden die Abschnitte des Straßennetzes in **Streckenelemente**  $s$  aufgeteilt. Die **Länge**  $l_s$  eines Streckenelements  $s$  in Metern oder Kilometern ergibt sich sinnfällig aus der Räumauflösung des jeweiligen Anwendungsfalls.<sup>36</sup> Zudem wird angenommen, dass die Menge **SE** der mit Systemelementen zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt ausstattbaren Streckenelemente *ex ante* bekannt ist.

Ein weiterer Ausgangspunkt der formalen Beschreibung stellt die **Verkehrsnachfrage auf Ebene von Relationen** dar. Jeder **Relation**  $r$  aus der Menge aller Relationen  $D$  ist per Definition ein **Quell-Netzeinspeiseknoten**  $o$  sowie ein **Ziel-Netzeinspeiseknoten**  $d$  zugewiesen. Jeder Quell-Netzeinspeiseknoten einer Relation  $r$  wird durch genau einen **Pfad**  $p_r$  mit dem **Ziel-Netzeinspeiseknoten**  $d$  der Relation verbunden werden.<sup>37</sup> Ein solcher Pfad ist als eine festgelegte

---

<sup>36</sup> Zwar kann zur Vereinfachung angenommen werden, dass jedes Streckenelement gleich lang ist, dann werden aber die letzten Streckenelemente der Pfade in aller Regel eine geringere Länge als die Übrigen aufweisen. Zudem können Verkehrsangebotsmodelle bzw. Netzwerkgraphen in aller Regel nur mittels Geoinformationssystemen gewonnen bzw. editiert werden, hier weisen die verschiedenen Streckenelemente immer unterschiedliche Längen auf. Also erscheint es auch aus praktischen Erwägungen sinnvoll, von verschieden langen Streckenelementen im Graph auszugehen.

<sup>37</sup> Zumeist existieren mehrere Pfade durch ein Netzwerk, die zwei Netzeinspeiseknoten miteinander verbinden können. Im Wege der Ableitung der Güterverkehrsnachfrage im Verfahrensteil Güterverkehrsnachfrage können mehrere Relationen je Knotenbeziehung erzeugt werden, die alle genau einen (anderen) Pfad zugewiesen bekommen. Das gesamte Verkehrsaufkommen eines Lkw-Typs zwischen den beiden Knoten wird

Abfolge von Streckenelementen definiert. Die Menge von Streckenelementen, die im Pfad  $p_r$  enthalten sind, wird mit  $S_{p_r}$  bezeichnet.

Die **Binärvariable**  $\delta_s$  zeige an, ob das Streckenelement  $s$  mit Systemelementen ausgestattet wurde oder nicht (es wurde „elektrifiziert“). Die Summe der Längen der ausgestatteten Streckenelemente  $s$  (Streckenkilometer) des Pfades  $p_r$  wird mit  $L_{p_r}$  beschrieben und ergibt sich dann als:

$$L_{p_r} = \sum_{s=1}^{S_{p_r}} l_s * \delta_s \quad (5-2)$$

mit:

$$s \in S_{p_r} \\ \delta_s \in \{0,1\}$$

Variablenbeschreibung:

$L_{p_r}$	Länge des Pfades $p$ (zugehörig zu Relation $r$ )
$l_s$	Länge des Streckenelements $l$
$\delta_s$	Binärvariable: Streckenelement $s$ ist ausgestattet oder nicht

Formel 5-2: Ermittlungsvorschrift für die Länge eines Pfades  
(Quelle: eigene Darstellung).

Um nun die mit einer „Elektrifizierung“ der Streckenelemente verbundenen **Emissionseinsparungen** gegenüber dem **Referenzfall** berechnen zu können, muss die **Güterverkehrsnachfrage** mit in die Betrachtung einfließen. Da die Emissionen von Treibhausgasemissionen abhängig von der Fahrleistung (gemessen in Fzkm) sind, muss diese aus der Befahrungsstärke (als Fz/Zeitraum) und der zurückgelegten Streckenlänge (in km) errechnet werden. Jeder Relation ist dazu, ebenfalls per Definition, zusätzlich zu einem Pfad auch ein Lkw-Typ  $t_r$  mit einem spezifischen Einsparungskennwert  $\gamma_{t_r}$  von Kohlendioxid-Emissionen gegenüber einem Referenzfall zugeordnet. Das der Relation  $r$  zugeordnete **Verkehrsaufkommen** (Anzahl der Lkw-Fahrten je Zeitraum) des zugewiesenen Lkw-Typs  $t$  mit  $f_{t_r}$  bezeichnet.



Die Summe der eingesparten Emissionen  $e_r$  für eine Relation  $r$  berechnet sich also zu:

$$e_{t_r} = f_{t_r} * \gamma_{t_r} * L_{p_r} = f_{t_r} * \gamma_{t_r} * \left( \sum_{s=1}^{S_{p_r}} l_s * \delta_s \right) \quad (5-3)$$

Variablenbeschreibung:

$e_{t_r}$	Summe der eingesparten Kohlenstoffdioxid-Emissionen der Relation $r$
$f_{t_r}$	Verkehrsaufkommen (Anzahl der Lkw-Fahrten je Zeitraum) des Lkw-Typs $t$ (zugehörig zu Relation $r$ )
$\gamma_{t_r}$	Spezifischer CO <sub>2</sub> -Emissionseinsparungskennwert des Lkw-Typs $t$ (zugehörig zu Relation $r$ )
$L_{p_r}$	Länge des Pfades $p$ (zugehörig zu Relation $r$ )
$l_s$	Länge des Streckenelements $l$
$\delta_s$	Binärvariable: Streckenelement $s$ ist ausgestattet oder nicht

Formel 5-3: Ermittlungsvorschrift für die Summe der eingesparten Emissionen einer Relation  $r$   
(Quelle: eigene Darstellung).

Die **Summe aller eingesparten Kohlendioxid-Emissionen** über alle Relation  $r \in D$  sei mit  $E_D$  bezeichnet und ergibt sich über alle Relationen  $D$  einer Relationsstichprobe als:

$$E_D = \sum_{r=1}^D e_{t_r} = \sum_{r=1}^D f_{t_r} * \gamma_{t_r} * L_{p_r} = f_{t_r} * \gamma_{t_r} * \left( \sum_{s=1}^{S_{p_r}} l_s * \delta_s \right) \quad (5-4)$$

Variablenbeschreibung:

$e_{t_r}$	Summe der eingesparten Kohlenstoffdioxid-Emissionen der Relation $r$
$l_s$	Länge des Streckenelements $l$
$f_{t_r}$	Verkehrsaufkommen (Anzahl der Lkw-Fahrten je Zeitraum) des Lkw-Typs $t$ (zugehörig zu Relation $r$ )
$L_{p_r}$	Länge des Pfades $p$ (zugehörig zu Relation $r$ )
$E_D$	Summe aller eingesparten Kohlenstoffdioxid-Emissionen einer Relationsstichprobe
$\gamma_{t_r}$	Spezifischer CO <sub>2</sub> -Emissionseinsparungskennwert des Lkw-Typs $t$ (zugehörig zu Relation $r$ )
$\delta_s$	Binärvariable: Streckenelement $s$ ist ausgestattet oder nicht

Formel 5-4: Ermittlungsvorschrift für die Summe der eingesparten Emissionen einer Relationsstichprobe  
(Quelle: eigene Darstellung).

Der spezifische Kostensatz eines Energieversorgungssystems zur Ausstattung eines Streckenkilometers (in beide Fahrtrichtungen) sei mit  $c_s$  bezeichnet. Das gesamte zur Verfügung stehende Budget zur Elektrifizierung der ausstattungs-fähigen Streckenelemente  $s \in SE$  wird hier mit  $B$  beschrieben. Als **Nebenbedingung** darf dieses zur Verfügung stehende **Budget** nicht überschritten werden.

Dann ergibt sich die Zielfunktion und damit auch das **Optimierungsmodell** als:

$$\max: E_D = \sum_{r=1}^D e_{t,r} = \sum_{r=1}^D f_{t_r} * \gamma_{t_r} * L_{p_r} = f_{t_r} * \gamma_{t_r} * \left( \sum_{s=1}^{S_{p_r}} l_s * \delta_s \right) \quad (5-5)$$

u.d.N.:

$$\sum_{r=1}^D \sum_{s=1}^{S_{p_r}} l_s * \delta_s * c_s \leq B$$

$$s \in p_r$$

$$\delta_s \in \{0, 1\}$$

$$s \in SE$$

$$r \in D$$

Variablenbeschreibung:

$e_{t_r}$	Summe der eingesparten Kohlenstoffdioxid-Emissionen der Relation r
$l_s$	Länge des Streckenelements l
$f_{t_r}$	Verkehrsaufkommen (Anzahl der Lkw-Fahrten je Zeitraum) des Lkw-Typs t (zugehörig zu Relation r)
$L_{p_r}$	Länge des Pfades p (zugehörig zu Relation r)
$l_s$	Länge des Streckenelements l
$E_D$	Summe aller eingesparten Kohlenstoffdioxid-Emissionen einer Relationsstichprobe
$\gamma_{t_r}$	Spezifischer CO <sub>2</sub> -Emissionseinsparungskennwert des Lkw-Typs t (zugehörig zu Relation r)
$\delta_s$	Binärvariable: Streckenelement s ist ausgestattet oder nicht
$e_{t_r}$	Summe der eingesparten Kohlenstoffdioxid-Emissionen der Relation r
$l_s$	Länge des Streckenelements l
$f_{t_r}$	Verkehrsaufkommen (Anzahl der Lkw-Fahrten je Zeitraum) des Lkw-Typs t (zugehörig zu Relation r)
$c_s$	Spezifischer Kilometer-Kostensatz eines Energieversorgungssystems (beide Fahrtrichtungen)
B	Zur Verfügung stehendes Ausbaubudget

Formel 5-5: OAASEE-Optimierungsmodell  
(Quelle: eigene Darstellung).

Zu maximieren sind also die **Emissionseinsparungen** gegenüber dem **Referenzfall**, wie sich der Zielfunktion in Formel 5-5 entnehmen lässt. Dabei sind die **Nebenbedingungen** in Formel 5-6 einzuhalten. Eine **Budgetrestriktion** verhindert, dass mehr Streckenelemente mit Systemelementen ausgestattet werden, als dies mit Hilfe der Verfügung stehenden Mittel möglich wäre. Eine weitere Nebenbedingung fordert, dass  $\delta_s$  nur die Werte 0 oder 1 annehmen und somit im binären Wertebereich liegt. Schließlich drückt eine letzte Nebenbedingung aus, dass nur Streckenelemente betrachtet werden, die Teil eines gültigen Pfades sind.

### Variante: Kostenminimierung

Die verfahrensseitig abgeleiteten Netzkonfigurationen mitsamt den errechneten **Kohlenstoffdioxid-Emissionseinsparungen** aus den Fahrtstatistiken werden an die steuernde Optimierungskomponenten bzw. deren **Zielfunktion** weitergegeben, die Budgetrestriktion ist eine zu erfüllende Nebenbedingung. Statt der Kohlenstoffdioxid-Emissionseinsparungen kann bei einer simulationsbasierten Optimierung aber auch jede andere erfasste Kenngröße als zu optimierender Zielfunktionswert interpretiert werden.

Das hier beschriebene **simulationsbasierte Optimierungsverfahren** bietet also noch die Möglichkeit, die **Fragestellung** gewissermaßen **umzudrehen**: eine als einzuhaltende Nebenbedingung formulierte **Mindestsumme von Emissionseinsparungen**  $G$ , die z.B. durch politische Entscheidungsfindungsprozesse ermittelt und festgelegt werden kann, soll mit möglichst **geringem finanziellen Aufwand** erreicht werden.

Dann ergibt sich die Zielfunktion und damit auch das **Optimierungsmodell** als:

$$\min: B = \sum_{r=1}^D \sum_{s=1}^{S_{pr}} l_s * \delta_s * c_s \quad (5-7)$$

u.d.N.:

$$\sum_{r=1}^D f_{t_r} * \gamma_{t_r} * \left( \sum_{s=1}^{S_{pr}} l_s * \delta_s \right) \geq G$$

$$s \in p_r$$

$$\delta_s \in \{0, 1\}$$

$$s \in SE$$

$$r \in D$$

Variablenbeschreibung:

$f_{t_r}$	Verkehrsaufkommen (Anzahl der Lkw-Fahrten je Zeitraum) des Lkw-Typs $t$ (zugehörig zu Relation $r$ )
$L_{p_r}$	Länge des Pfades $p$ (zugehörig zu Relation $r$ )
$l_s$	Länge des Streckenelements $l$
$G$	Mindestsumme aller eingesparten Kohlenstoffdioxid-Emissionen einer Relationsstichprobe
$\gamma_{t_r}$	Spezifischer CO <sub>2</sub> -Emissionseinsparungskennwert des Lkw-Typs $t$ (zugehörig zu Relation $r$ )
$c_s$	Spezifischer Kilometer-Kostensatz eines Energieversorgungssystems (beide Fahrtrichtungen)
$B$	Zur Verfügung stehendes Ausbaubudget

Formel 5-6: OAASEE-Optimierungsmodell als Variante Kostenminimierung  
(Quelle: eigene Darstellung).

---

Welche der **beiden Fragestellungen** mit Hilfe des Verfahrens beantwortet werden soll, hängt letztlich vom **Modellsubjekt** und dessen Anwendungsfällen ab. Die praktische Erfahrung der Verkehrspolitik zeigt jedoch, dass eher beschränkte finanzielle Mittel zur Verfügung stehen, sodass diese bestmöglich zur Vermeidung von Kohlenstoffdioxid-Emissionen eingesetzt werden sollten. Im hier verwendeten **Anwendungsbeispiel** wird mit zu **maximierenden Emissionseinsparungen** gearbeitet, da sich mit dieser Formulierung die Modellergebnisse besser an der vorhandenen Literatur spiegeln lassen. Die modellgestützte Anwendung des hier beschriebenen Verfahrens wird im folgenden Kapitel für das Beispiel des eHighway in Deutschland beschrieben.

---

---

## 6. Anwendungsbeispiel: eHighway in Deutschland

---

Bei Fertigstellung dieser Arbeit wird im Rahmen dreier Feldversuche das eHighway-System zur oberleitungsgebundenen Elektrifizierung des Schwerverkehrs in Deutschland erprobt. Für den **Anwendungsfall der deutschen Autobahnen** wurden flankierend bereits erste Studien veröffentlicht, die zukünftige Netzkonzeptionen vorschlagen (Hacker et al. 2020). Die Ergebnisse aus der modellbasierten Anwendung des in Kapitel 5 vorgestellten Verfahrens lassen sich daher grundsätzlich an den Erkenntnissen dieser Studien spiegeln. Zudem weist das eHighway-System einen relativ hohen technologischen Reifegrad auf.

Aus diesen Gründen wurde der **eHighway** als **Fallbeispiel** zur Anwendung des entwickelten Verfahrens ausgewählt. Ziel des Fallbeispiels ist es einerseits, durch die Anwendung des Verfahrens auf ein praktisches Beispiel **modellbezogene Erkenntnisse** abzuleiten und so das Verfahren selbst in Bezug auf die generierten **Modellergebnisse bewerten** zu können. Andererseits dient der Anwendungsfall der **Ableitung von Korridoren, die sich für eine zukünftige Netzkonfiguration** auf dem deutschen Fernstraßennetz bei Unterstellung eines sog. Lückenkonzepts besonders eignen (Hacker et al. 2020, S. 87). Bei diesem Konzept muss nicht das gesamte übergeordnete Straßennetz mit eHighway-Systemkomponenten ausgestattet sein. Vielmehr unterstellt das Lückenkonzept fahrzeugseitig verbaute Energiespeicher von relativ hoher Kapazität, was den Vorteil bietet, von der Ausstattung bestimmter Teilstrecken absehen zu können. Aus der Analyse der abgeleiteten Ausbaukorridore lassen sich auf Basis des Lückenkonzepts **Handlungsimplicationen** ableiten.

Dazu wurde auf Grundlage des in Kapitel 5 vorgestellten Verfahrens das gekoppelte Simulations- und Optimierungsmodell OAASEE entworfen. Die technische Umsetzung des Modells ist in Anhang 4 genauer beschrieben. An dieser Stelle soll lediglich darauf hingewiesen werden, dass die kommerzielle Simulationsumgebung AnyLogic dazu verwendet worden ist, die um Eigenentwicklungen und gemeinfreie Java-Bibliotheken erweitert worden ist (Borshchev 2013; Grigoryev 2016). Die Anwendung des so entstandenen, gekoppelten Simulations- und Optimierungsmodells auf das genannte Fallbeispiel wird in diesem Kapitel dargestellt.

Hierzu wird in zunächst die bei Verfassen dieser Arbeit vorgefundene **Situation hinsichtlich des eHighway in Deutschland** näher beschrieben. Daran anknüpfend wird die für das Modell bzw. das Anwendungsbeispiel verwendete **Datengrundlage** aufgezeigt, was zum Ersten das Vorgehen zur Disaggregation der zugrundeliegenden Datenbasis im Rahmen des Verfahrensteils Güterverkehrsnachfrage umfasst. Zum Zweiten werden die verwendeten Referenzfahrzeuge, auf die das Modell aufbaut, vorgestellt. Zum Dritten werden dann abschließend einige weitere Datenquellen wie z.B. das verwendete Verkehrsangebotsmodell dargestellt. Abschließend wird die **Modellanwendung** dokumentiert, was zunächst die **Festlegung von Modellszenarien** erfordert. Daran anknüpfend werden die **Ergebnisse der Modellanwendung** je Szenario vorgestellt. Auf dieser Basis werden mögliche Netzausbaukorridore identifiziert und diese weiter untersucht um abschließend einen Vorschlag zum zukünftigen Netzausbau zu formulieren. Zuletzt erfolgt ein **Vergleich der Ergebnisse** mit den **Erkenntnissen** aus den erwähnten, ersten **Studien**.

---

## 6.1. Situation in Deutschland

Das *eHighway*-System soll die Energieversorgung von Lastkraftwagen während der Fahrt mittels Oberleitungen sicherstellen. Um das System zur vollständigen Marktreife weiterzuentwickeln, werden einerseits die erwähnten **Feldversuche** in Deutschland durchgeführt, in deren Rahmen auch **begleitende Forschungsprojekte** durchgeführt wurden, die einige wichtige Aspekte mit unmittelbarem Bezug zu den Feldversuchen näher beleuchtet haben (Boltze et al. 2020).

Andererseits wurden flankierend zu den Feldversuchen einige **umsetzungsrelevante Aspekte** in weiteren, eigenständigen Forschungsprojekten beleuchtet. Zum einen hatten diese Projekte z.B. grundlegende, vergleichende **Wirtschaftlichkeitsrechnungen** zum Inhalt, in denen die OH-Lkw mit anderen technologischen Alternativen verglichen worden sind (IFEU und PTV Transport Consult, Fraunhofer-Arbeitsgruppe SCS 2018). Ein Vergleich des *eHighway* mit anderen Systemen unterblieb zu diesem Zeitpunkt jedoch. Zum anderen standen die **Identifikation potentieller Nutzergruppen und Hemmnisse** für den Einsatz von OH-Lkw im Fokus der Forschung (IFEU et al. 2018; Jöhrens et al. 2018). Daneben wurden verschiedene Antriebstechnologien für schwere Nutzfahrzeuge vergleichend **aus ökologischer Perspektive bewertet** (Kühnel et al. 2018). Darauf aufbauend wurden außerdem **Empfehlungen** für den weiteren **Netzausbau formuliert** bzw. die eine **Einführungsstrategie** für das *eHighway*-System in Deutschland vorgeschlagen (z.B. o.A. 2019g; IFEU und PTV Transport Consult, Fraunhofer-Arbeitsgruppe SCS 2018; Hacker et al. 2020). Hierbei wurde jedoch **kein Lückenkonzept** unterstellt, sondern eine **Vollausstattung** des gesamten betrachteten Netzes.

Für die vorliegende Arbeit von besonderem Interesse sind Veröffentlichungen zu den beiden letztgenannten Themenbereichen, da sich hier Anknüpfungspunkte zur Einordnung der erlangten Erkenntnisse aus der Modellanwendung bieten. Aus diesem Grund werden im Folgenden kurz die wesentlichen Erkenntnisse dieser Arbeiten wiedergegeben.

### Roadmap OH-Lkw

Im Rahmen des Forschungsprojekts **Roadmap OH-Lkw** wurden die Voraussetzungen für den Einsatz von OH-Lkw „... in einer Frühphase des Systemaufbaus beschrieben und Einsatzgebiete geographisch umrissen ...“ (IFEU und PTV Transport Consult, Fraunhofer-Arbeitsgruppe SCS, 2018, S. 5 bzw. Jöhrens et al. 2020). Zur Ableitung eines Ausbaukonzepts, sprich einer möglichen **initialen Netzwerkkonfiguration** für den *eHighway auf deutschen Autobahnen*, wurde das kommerzielle **Verkehrsnachfragemodell PTV Validate** verwendet (IFEU und PTV Transport Consult, Fraunhofer-Arbeitsgruppe SCS 2018, S. 6). Dieses Modell besteht einerseits aus allen verfügbaren Modulen der Verkehrsnachfrage-Modellierungsumgebung **PTV VISUM** sowie andererseits einer mitgelieferten **Datengrundlage** zur Versorgung von VISUM mit geeigneten Daten (o.A. 2020b; PTV Group 2012).

Die genaue Zusammensetzung der verwendeten Datenbasis sowie der Einsatz von *PTV Validate* im Rahmen des Projekts *Roadmap OH-Lkw* sind leider nur schlaglichtartig dokumentiert worden. So bestand das **Verkehrsangebotsmodell** einerseits aus ca. 9.400 Verkehrszellen, die sich an den administrativen Grenzen der Gebietseinheiten orientieren. Für den Anwendungsfall wurde jedoch eine höhere Aggregationsebene gewählt: die Ebene der Kreise und kreisfreien Städte mit ca. 400 Zellen (Jöhrens et al. 2020, S. 89). Andererseits wurde das Verkehrsangebot durch ein **Verkehrsnetzmodell** des kommerziellen Anbieters HERE abgebildet (IFEU und PTV Transport Consult, Fraunhofer-Arbeitsgruppe

---

---

SCS 2018, S. 7). Die räumlich differenzierte **Güterverkehrsnachfrage** basiert einerseits auf der Güterkraftverkehrsstatistik des KBA sowie andererseits der Verflechtungsprognose des BMVI für das Jahr 2030 (IFEU und PTV Transport Consult, Fraunhofer-Arbeitsgruppe SCS 2018, S. 7). Hinsichtlich der **Hauptverkehrsbeziehungen** werden im Modell nur deutsche Binnenverkehre berücksichtigt (Jöhrens *et al.* 2020, S. 89).

Das **Vorgehen** bei der **Modellierung** der **Verkehrsnachfrage** entspricht dabei dem klassischen **Vier-Stufen-Algorithmus**: das gütergruppenspezifische **Aufkommen** je Zone (in Gewichtseinheiten) wird unter Verwendung von **distanzabhängigen Widerstandsfunktionen** mit einem **Gravitationsmodell** in **Quell-Ziel-Relationen** aufgeteilt. Die Widerstandsfunktion wurde dabei an der Verflechtungsmatrize zum Bundesverkehrswegeplan (BVWP) 2030 kalibriert (siehe auch Abschnitt 6.2.1). Die nun vorliegenden **Mengenströme je Gütergruppe** werden unter Nutzung **gütergruppenspezifischer Fahrzeugauslastungsfaktoren** in **Fahrzeugströme** umgerechnet, wozu verschiedene Musterfahrzeuge herangezogen werden. Die so entstehenden **Fahrzeug-Fahrten** werden nun verschiedenen Netzzugangspunkten zugeordnet und eine **Routenwahl** modelliert. Daran anknüpfend wurde eine **belastungsabhängige Verkehrsumlegung** durchgeführt, die an Zählstellendaten der BAST kalibriert worden ist.

Auf Grundlage der räumlich differenzierten und auf das Straßenverkehrsnetzmodell umgelegten **Güterverkehrsnachfrage** sowie durch Kopplung eines **Fahrzeug-Emissionsmodells** wurde nun die Summe der jährlichen Kohlenstoffdioxid-Emissionen für 2030 geschätzt. Die vorwiegend im Fernverkehr zum Einsatz kommenden **Sattelzugmaschinen** wurden hierbei mit einem Anteil von ca. 45% als **Hauptverursacher** dieser **Emissionen** identifiziert (IFEU und PTV Transport Consult, Fraunhofer-Arbeitsgruppe SCS 2018, S. 12). Daher wurde für die folgenden Untersuchungen die Sattelzugmaschine als Referenzfahrzeug festgelegt.

Um den wirtschaftlichen Betrieb von OH-Lkw unter den getroffenen Kostenparametern (*best case*) in der Einführungsphase des *eHighway* in Deutschland zu ermöglichen, wurde eine **tägliche Fahrleistung** von 215 Fahrzeugkilometern pro Tag (Fzkm) ermittelt wobei als Umrechnungsfaktor der Jahres- auf Tagesfahrleistungen 250 Betriebstage unterstellt worden sind (ebenda, S. 18). Die Energiespeicherkapazität wurde mit 5 kWh als relativ gering angenommen, wodurch eine Vollausstattung der Fahrstrecken mit *eHighway*-Systemelementen notwendig wird. Auf dieser Basis wurde unter Annahme eines entsprechenden Nach- und Vorlaufs eine **Mindestlänge von 120 Kilometern für eine Relation während der Einführungsphase** ermittelt, damit sich diese für eine oberleitungsgebundene Energieversorgung eignet.

Für eine **Phase mit vorangeschrittenem Netzausbau** wurde das Jahr 2030 in Harmonisierung mit dem Prognosefall des BVWP als Ankerzeitpunkt gewählt. Für das Verkehrsnetzmodell wurde also ein Ausbau gemäß BVWP unterstellt. Die resultierende Netzkonfiguration mit zeitlichen Ausbaustufen ist in Abbildung 6-1 dargestellt und weist eine mit Oberleitungen ausgestattete **Streckenlänge von 3.200 Kilometern** auf, jeweils beide Fahrtrichtungen werden als lückenlos ausgestattet angenommen (Jöhrens *et al.* 2020, S. 6). In dieser Phase sinkt die aus ökonomischer Sicht notwendige, **tägliche Fahrleistung** für einen wirtschaftlichen Betrieb von OH-Lkw auf ca. 115 Fzkm pro Tag im Bestfall-Szenario (IFEU und PTV Transport Consult, Fraunhofer-Arbeitsgruppe SCS 2018, S. 27). Der im Referenzfahrzeug verbaute Energiespeicher wird mit einer Kapazität von 5 kWh angenommen. Zwar wird auf die Möglichkeit des Einsatzes größerer Energiespeicher und somit auch auf die Möglichkeit zur Aussparung bestimmter



Streckenelemente hingewiesen, es wurden aber keine weiteren Untersuchungen unternommen. Trotzdem wird aus wirtschaftlichen Erwägungen eine Mindeststrecke von 50 Kilometern unter Draht empfohlen.

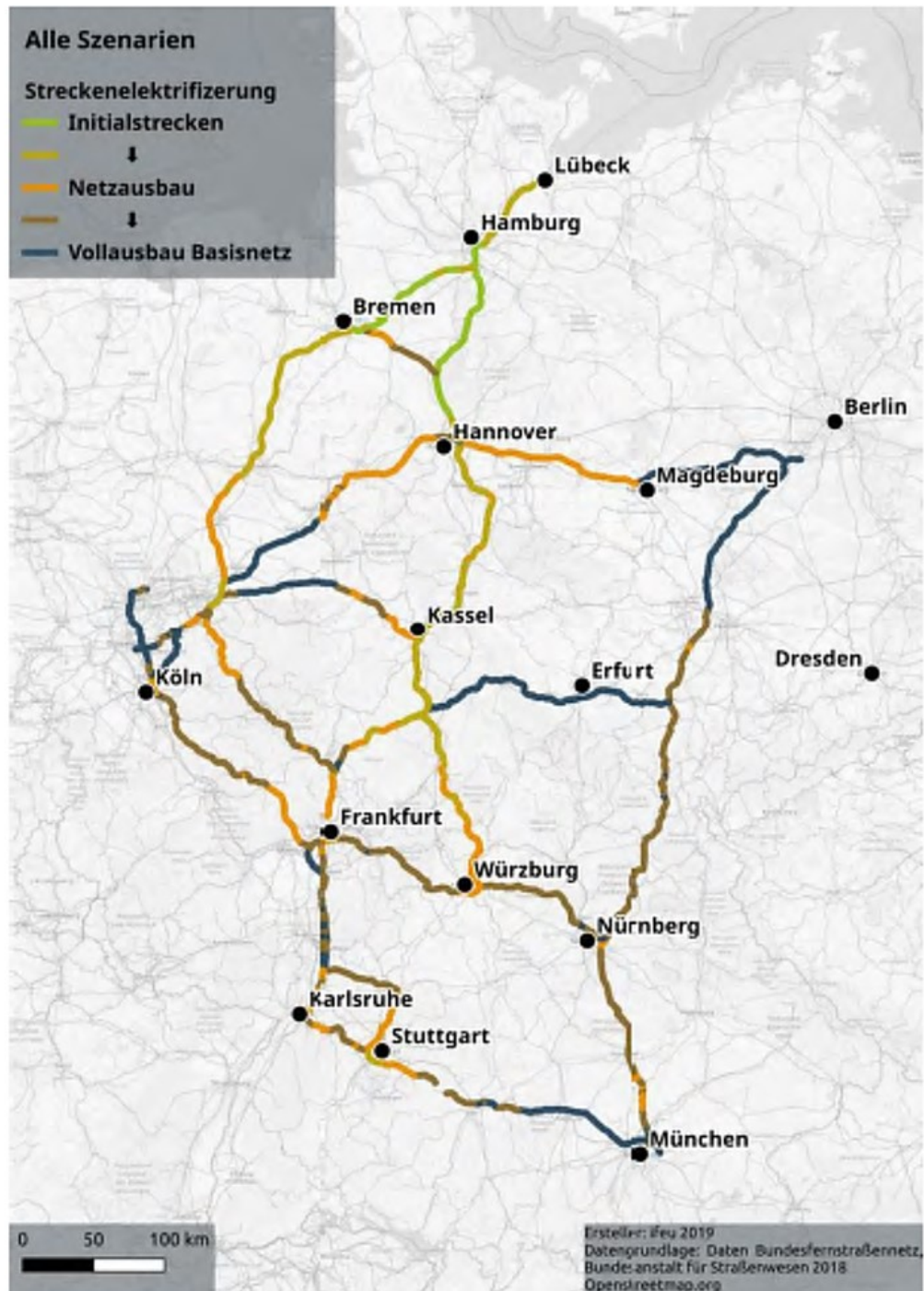


Abbildung 6-1: Vorzugs-Netzkonfiguration gemäß Roadmap OH-Lkw  
(Quelle: Jöhrens *et al.* 2020, S. 6).

Die gesamte **Fahrleistung** summiert sich für den **Prognosefall 2030** im Bereich der relevanten Fahrzeuge auf etwa 72,8 Mio. Fzkm pro Tag (Kühnel *et al.* 2018, S. 31). Hiervon werden etwa 41 Mio. Fzkm pro Tag auf Teilstrecken erbracht, die grundsätzlich zur Ausstattung mit Oberleitungen geeignet wären (d.h. in diesem Fall Bundesautobahnen und vierstreifige Bundesstraßen). Gegeben der beschriebenen Rahmenbedingungen könnten also im Ergebnis etwa **56% der Fahrleistung im relevanten Segment des Straßengüterverkehrs** durch OH-Lkw erbracht werden. Für die Berechnung der begleitenden Kohlenstoffdioxid-Emissionen wurden die in einem Vorprojekt ermittelten **Verbrauchs- und Emissionskennwerte** verwendet. Der gesamte Straßengüterverkehr im relevanten Segment emittiert im Jahr 2030 demnach etwa **49,2 Mio. t CO<sub>2</sub>** bei einer sog. *Well-to-Wheel* (kurz WtW) Betrachtung, wenn er komplett mit Dieselmotoren als Antriebstechnologie erbracht wird (Jöhrens *et al.* 2020, S. 39ff).<sup>38</sup>

		2020	2030
<b>Konventioneller Diesel-Lkw</b>		Ø31,4 l/100km 26,8-35,8 l/100 km	Ø27,2 l/100km 23,2-30,9 l/100 km
<b>O-HEV</b>	<b>Strommodus</b>	Ø129 kWh/100km 110-147 kWh/100km	Ø121 kWh/100km 104-138 kWh/100km
	<b>Hybridmodus</b>	Ø27,8 l/100km 23,8-31,7 l/100 km	Ø24,3 l/100km 20,7-27,6 l/100 km
<b>O-BEV</b>	<b>Oberleitungsmodus</b>	Ø128 kWh/100km 109-145 kWh/100km	Ø120 kWh/100km 102-136 kWh/100km
	<b>Batteriemodus</b>	Ø116 kWh/100km 99-132 kWh/100km	Ø106 kWh/100km 91-121 kWh/100km

Abbildung 6-2: Fahrzeugkonfigurationen gemäß Roadmap OH-Lkw  
(Quelle: Jöhrens *et al.* 2020, S. 82).

Für eine Szenariorechnung wird nun auf eine **Stichprobe von Relationen** zurückgegriffen, die insgesamt eine Fahrleistung von **etwa 6,7 Mrd. Fzkm (Diesel)** umfasst. Hierbei werden insgesamt **etwa 6,6 Mio. t Kohlendioxid im Jahr 2030** emittiert (Kühnel *et al.* 2018; Jöhrens *et al.* 2020, S. 35ff). Auf Basis dieser Stichprobe werden nun **Minderungspotentiale** des **Kohlendioxidausstoßes** unter verschiedenen **Netzkonfigurationen** bzw. bei Unterstellung der **Umsetzung verschiedener politischer Maßnahmen** zur Steigerung der Attraktivität von OH-Lkw berechnet (Jöhrens *et al.* 2020, S. 38ff). Die Stichprobe umfasst also etwa 13% der CO<sub>2</sub>-Emissionen und 9,2 % der jährlichen Gesamtfahrleistung. Eine Übersicht der Ergebnisse der Szenariorechnung für das Jahr 2030 auf Basis der Stichprobe findet sich in Abbildung 6-3.

<sup>38</sup> Bei dieser Bilanzierungsmethode werden die Emissionen über den gesamten Lebenszyklus einer Technologie summiert und auf einen Kennwert umgelegt (Ausberg *et al.* 2015 bzw. Decker und Schippl 2015, S. 427ff). Berücksichtigt werden also die Emissionen während der Fahrt sowie die Emissionen, die bei der Herstellung der *eHighway*-Systemelemente (Fahrzeuge und Infrastruktur) entstehen. Die Gesamtemissionen werden dann auf die geschätzte Gesamtfahrleistung umgelegt und so einer durchschnittlicher Emissionskennwert errechnet.

Szenario	Referenz	Infra- struktur	+el. Mautbe- freiung	+EEG-Ermä- ßigung	+Kaufprämie	+CO <sub>2</sub> -Preis
O-Infrastruktur	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Fzg-Herstellung	0,45	0,53	0,58	0,55	0,58	0,63
WtT	0,75	1,93	2,03	1,95	1,92	1,97
TtW	4,76	1,62	1,47	1,59	1,64	1,56
Summe	5,97	4,10	4,09	4,10	4,14	4,17
Reduktion ggü. Referenz (nur TtW):		3,1	3,3	3,2	3,1	3,2
Reduktion ggü. Referenz (LCA):		1,87	1,88	1,87	1,82	1,80

Abbildung 6-3: Kohlendioxid-Emissionen im Jahr 2030 gemäß Roadmap OH-Lkw (Mio. t CO<sub>2eq</sub>)  
(Quelle: Jöhrens *et al.* 2020, S. 40).

In einem Referenzszenario wird eine Entwicklung abgebildet, die bis zum Jahr 2030 keine alternativen Antriebskonzepte berücksichtigt, jedoch Effizienzsteigerungen bei Dieselmotoren unterstellt. In diesem Fall reduziert sich auf Basis der betrachteten Stichprobe um 0,63 auf 5,97 Mio. t Kohlendioxid WtW. Alle weiteren Szenarien haben gemeinsam, dass eine Netzkonfiguration mit einer ausgestatteten Gesamtstreckenlänge von 3.235 km vorliegt (Jöhrens *et al.* 2020, S. 30ff). Bei Umsetzung aller Maßnahmen zeigt sich, dass im Jahr 2030 etwa **9,24 Mio. t CO<sub>2</sub>-Emissionen** pro Jahr auf den in Frage kommenden Streckelementen für die Stichprobe eingespart werden könnten, was einer Einsparung von etwa **2.844 Tonnen pro ausgestattetem Streckenkilometer** entspricht.

### StratON: Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge

In einem weiteren Forschungsprojekt mit der Bezeichnung **StratON** wurden Markthochlaufs- und Einführungsstrategie für den eHighway in Deutschland aus verschiedenen Perspektiven untersucht (Hacker *et al.* 2020). In diesem Kontext wurden auch spezifische **Netzwerkkonfigurationen** abgeleitet. Hierfür wurden sowohl einzelne Teilstrecken analysiert wie auch Netzabschnitte. Daneben wurden mögliche **Ausbaustufen** definiert und die **Verkehrsnachfrage** für **unterschiedliche Ausbauzustände** verglichen.

Als Basis für die **Modellierung der Verkehrsnachfrage** wurde im Rahmen von StratOn die Datengrundlage des BVWP 2030 verwendet, da die Verflechtungsmatrize von Intraplan für den BVWP erstellt wurde (Hacker *et al.* 2020, S. 90-91). Die Verkehrsnachfrage lag für die verkehrliche Analyse disaggregiert auf der Ebene der **Quell-Ziel-Beziehungen im belasteten Verkehrsnetz als Tagesfall** vor (ebenda, S. 99).<sup>39</sup> Da im Projekt StratOn mit dem Jahr 2050 ein **abweichendes Prognosejahr** im Vergleich zum BVWP bzw. oder dem Projekt *Roadmap OH-Lkw* gewählt wurde, musste die Verkehrsnachfrage durch Einsatz von nicht näher beschriebenen **Matrixanpassungsverfahren** hochgerechnet worden ist.

<sup>39</sup> Der Tagesteiler weicht mit 300 unterstellten Betriebstagen ebenfalls vom Projekt Roadmap OH-Lkw ab (Hacker *et al.* 2020, S. 99).

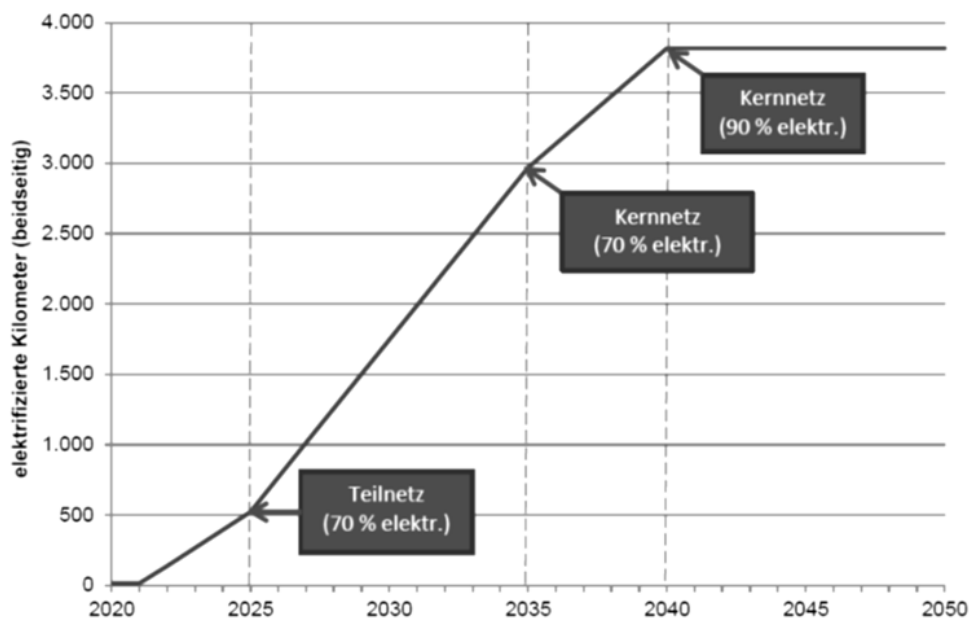


Abbildung 6-4: Hochlauf der mit Oberleitungen ausgestatteten Kilometer gemäß StratOn  
(Quelle: Hacker et al. 2020, S. 149).

Auf Grundlage der so angepassten Verkehrsnachfrage wurde in einem ersten Schritt eine Vorauswahl von Strecken getroffen, die sich zur Ausstattung mit Oberleitungen vor allem aus logistisch-verkehrlicher Perspektive besonders eignen (Bundesautobahnen A1 bis A9, A61, A24). Auf Basis der selektierten Strecken und weiterer Kriterien wurden **drei Ausbaustufen** für das **eHighway**-System auf deutschen Fernstraßen abgeleitet (ebenda, S. 122ff). Die Ausbaustufen sind jeweils durch eine zunehmende Länge ausgestatteter Streckenkilometer und **unterschiedliche elektrotechnische Leistungsparameter** gekennzeichnet, um der erhöhten Anzahl leistungsbeziehender Fahrzeuge gerecht werden zu können.

Dementsprechend variieren auch die Kosten einer Ausstattung mit den *eHighway*-Komponenten: für das sog. **Startnetz** von ca. 500 km Länge werden bis 2025 ca. 0,85 Mrd. Euro für eine Ausstattung in beide Fahrtrichtungen benötigt während für das sog. **Ausbaunetz** mit einer Länge von ca. 2.000 km etwa 5,1 Mrd. Euro veranschlagt werden. Das Ausbaunetz soll bis 2035 fertiggestellt sein. Die letzte Ausbaustufe, das sog. **Endausbaunetz bis 2040**, soll mit einer Länge von etwa 4.000 km zwischen 10,2 und 12,2 Mrd. Euro kosten (ebenda, S. 88). Der Hochlauf der mit Oberleitungen ausgestatteten Streckenkilometer gemäß StratOn ist in Abbildung 6-4 dargestellt

	Pilotstrecken	Stern (70%)	Kern-Netz (70%)	Kern-Netz (90%)
Streckenlänge	18 km	747 km	4.242 km	4.242 km
elektrifizierte km		523	2969	3817
Jahr	2020	2025	2035	2040
Zubau (km/Jahr)		102	245	170

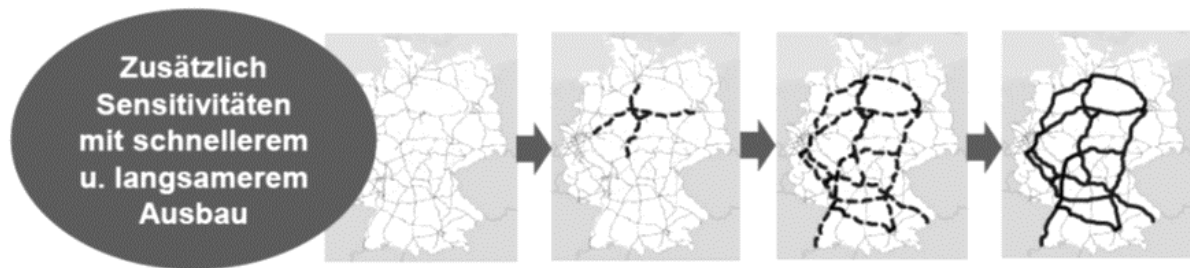


Abbildung 6-5: Übersicht der Netzausbaustufen gemäß StratOn  
(Quelle: o.A. 2019g).

Zur Ermittlung der gesamten elektrischen **Fahrleistung** und damit des **Kohlenstoffdioxid-Emissionsminderungspotentials** wurden verschiedene Szenarien definiert, die einerseits unterschiedliche Fahrzeugkonfigurationen und andererseits unterschiedliche Ausbaustände des eHighway-Netzes unterstellen (Hacker *et al.* 2020, S. 140ff). Die Fahrzeuge werden hier im Wege eines Fahrzeugmix in jedem Szenario unterstellt (d.h. z.B. ein bestimmter Anteil an Fahrzeugen mit größeren und kleineren Energiespeichern in Abhängigkeit des zu absolvierenden Vor- und Nachlaufs einer jeden Relation). Hierdurch entstehen **szenarien-spezifische Emissionsminderungspotentiale und Fahrleistungen**, die an geeigneter Stelle wiedergegeben werden.



---

## 6.2. Datengrundlage für das Anwendungsbeispiel

### 6.2.1. Güterverkehrsnachfrage

Zur Bestimmung des bestmöglichen Streckenausstattungsgrads deutscher Autobahnen mit *eHighway*-Systemelementen sollte, auch unabhängig von diesem konkreten Anwendungsbeispiel, eine **möglichst öffentlich zugängliche Datengrundlage** verwendet werden, die die empirisch beobachtete Güterverkehrsnachfrage möglichst gut abbildet und die **sowohl die Vergleichbarkeit als auch die Nachvollziehbarkeit** der Ergebnisse gewährleistet. Zwar könnten zur Modellierung der Verkehrsnachfrage, ungeachtet der Verfügbarkeit entsprechender Daten, die in Kapitel 3.2.4 beschriebenen Verfahren eingesetzt und ein eigenständiges Güterverkehrsnachfragemodell entwickelt werden, dies erscheint jedoch mit Blick auf das Untersuchungsziel allerdings als wenig zielführend und unverhältnismäßig. Vor diesem Hintergrund bietet es sich an, für diesen Anwendungsfall vor allem auf die öffentlich zugängliche **Datengrundlage** zurückzugreifen, die zur Erstellung des **Bundesverkehrswegeplans (BVWP) 2015** verwendet wurde, (Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur 2014; PTV Group und TCI Röhling 2016).<sup>40</sup>

Die hier verwendete BVWP-Verkehrsverflechtungsmatrix ist für die deutschen Verkehrszellen räumlich auf die Ebene der Kreise und kreisfreien Städten (NUTS 3) aufgelöst.<sup>41</sup> Ausländische Verkehrszellen sind teilweise gleich zониert, teilweise können sie auch höher zониert sein (z.B. NUTS 2). Die Verkehrsverflechtungsmatrix ist als Güterstrommatrix mit Jahresaufkommen und -verkehrsleistung je Relation verfügbar. Die Güterströme liegen als Tonnage und Verkehrsleistung als Jahreswerte für 2010 und 2030 vor und sind nach verschiedenen Gütergruppen aufgelöst.

Da die **Verflechtungsmatrix** einerseits öffentlich zugänglich ist und andererseits die im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Veröffentlichungen zur Netzkonfiguration des *eHighway*-Systems im Wesentlichen die gleiche Datenquelle als Basis für deren Berechnungen genutzt haben, wird sie für dieses Anwendungsbeispiel **als Ausgangspunkt verwendet**. Ein **Vergleich** der hier erzielten Ergebnisse ist, wie bei jedem Vergleich zweier zwar ähnlicher jedoch methodisch unterschiedlicher Modelle, zwar grundsätzlich möglich, jedoch sollten diese methodischen Unterschiede bei der Einordnung der Erkenntnisse berücksichtigt werden.

---

<sup>40</sup> Der BVWP ist ein Planungsinstrument, mit dem der Handlungs- und Finanzierungsrahmen für einen bestimmten Prognosezeitraum (für den BVWP 2015 endet dieser im Jahr 2030) hinsichtlich der anstehenden Investitionen in die Verkehrsinfrastruktur des Bundes vorgegeben werden soll (Schulz *et al.* 2016, S. 43ff). Der BVWP wird vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und digitale Infrastruktur (BMVI) erarbeitet und von der Bundesregierung beschlossen. Im BVWP werden neben Investitionen für die Erhaltung der Bestandsinfrastruktur auch Mittel für den Aus- und Neubau von Verkehrsanlagen zu einzelnen Projekten zugeordnet. Im Rahmen der Aufstellung wird nachgewiesen, ob erwogene Verkehrsinfrastrukturprojekte unter Berücksichtigung deren prognostizierter Verkehrsnachfrage volkswirtschaftlich lohnenswert sind. Dies geschieht z.B. im aktuellen BVWP 2030 durch eine Nutzen-Kosten-Analyse und anschließende Reihung der Projekte (Stock und Bernecker 2014, S. 355ff). Aus diesem Grund wird der Aufstellungsprozess eines jeden BVWP auch durch eine modellbasierte Abschätzung der Verkehrsnachfrage für den Güter- und Personenverkehr zum Prognosezeitpunkt begleitet, die alle Verkehrsträger umfasst. Für den BVWP 2015 wurde daher auf Basis einer Verkehrsverflechtungsmatrix von 2010 eine Verkehrsprognose für das Jahr 2030 erstellt.

<sup>41</sup> Die NUTS-Klassifikation (frz. *Nomenclature des unités territoriales statistiques*) ist eine hierarchische Systematik zur eindeutigen Identifikation räumlicher Einheiten der amtlichen Statistik in den Mitgliedstaaten der Europäischen Union (Hoffmeyer-Zlotnik 2013, S. 183).

### 6.2.1.1. Vorgehen

Die **BVWP-Verkehrsverflechtungsmatrix** liegt für den Güterverkehr digitalisiert vor und umfasst etwa **3,1 Mio. Datensätze** (Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur 2014). Daher wurde sie zunächst in eine Datenbankstruktur überführt und die Datensätze wurden anschließend normalisiert. Je Datensatz werden die jährliche Güterverkehrsleistung (tkm) und das jährliche Güteraufkommen in Tonnen zwischen zwei Verkehrszellen erfasst. Das **Güteraufkommen** bzw. die **Güterverkehrsleistung** werden weiter nach Verkehrsträger und nach **NST-Gütergruppe** differenziert.<sup>42</sup> Zudem liegen die Datensätze der Verkehrsverflechtungsmatrix in Form der Ablauflogik einer **intermodalen Transportkette** vor (siehe Abbildung 6-6 für eine Illustration).

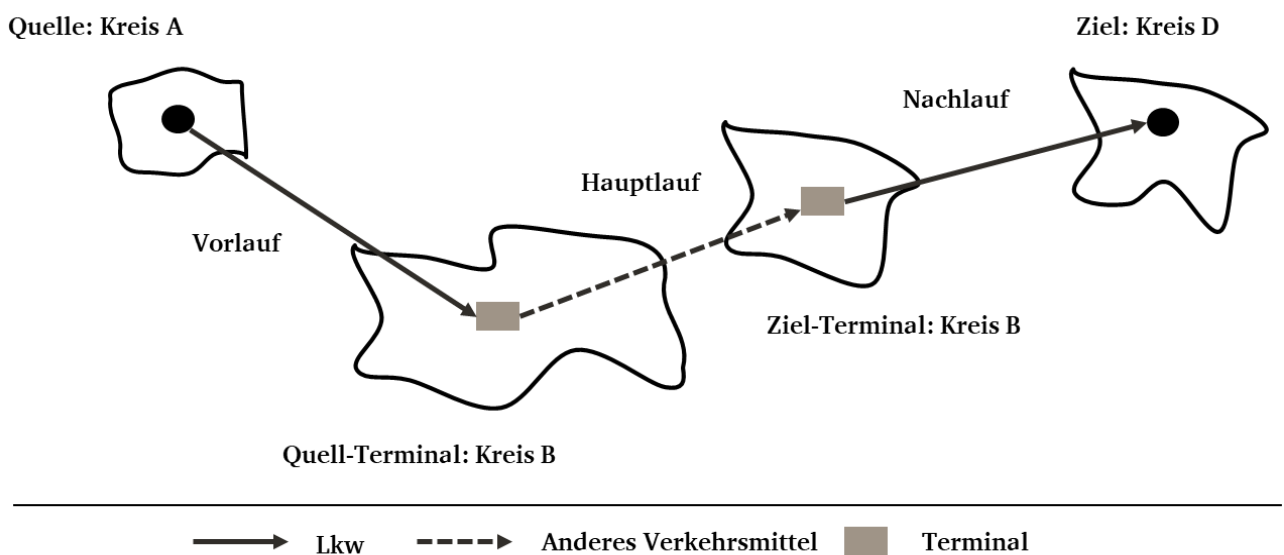


Abbildung 6-6: Transportketten im BVWP  
(Quelle: eigene Darstellung).

Bei einer **intermodalen Transportkette** fließt das Güteraufkommen zunächst von einer Quellzelle zu einer Zelle, die ein intermodales Terminal enthält, es entsteht ein sog. **Vorlauf**. Von diesem Quellterminal aus fließt das Güteraufkommen im Rahmen des **Hauptlaufs** einem Zielterminal zu, wo ein weiterer Umschlag stattfindet. Ein letzter Güterfluss, der als **Nachlauf** bezeichnet wird, verbindet dann die Zelle des Zielterminals mit dem eigentlichen Ziel des Güterflusses, der Zielzelle. Bei Relationen, die ausschließlich für ein Verkehrsmittel vorliegen, sind die entsprechenden Feldeinträge für das Quell- bzw. Zielterminal identisch mit denjenigen der Quell- und Zielzellen. Zudem ändert sich für den Vor-, Haupt- und Nachlauf der Schlüssel für das Verkehrsmittel nicht, sodass die direkten Relationen eindeutig identifiziert werden können.

Um schließlich die für das *eHighway*-Anwendungsbeispiel notwendigen gerichteten **Relationen auf Ebene der Knotenbeziehungen** zu erhalten, waren auf Grund der Matrixstruktur zunächst eine Reihe

<sup>42</sup> Das Einheitliche Güterverzeichnis für die Verkehrsstatistik (frz.: Nomenclature uniforme des marchandises pour les statistiques de transport; NST) ist eine Erfassungssystematik zur Klassifizierung von Gütern für Verkehrsstatistiken, das von der Europäischen Union erlassen worden und in den Mitgliedsstaaten verbindlich anzuwenden ist. (Buthe 2017, S. 79-81).



von **Datenbearbeitungs- bzw. -bereinigungsverfahren** notwendig. Die Arbeitsschritte sind in Abbildung 6-7 als Ablaufdiagramm überblicksartig dargestellt.

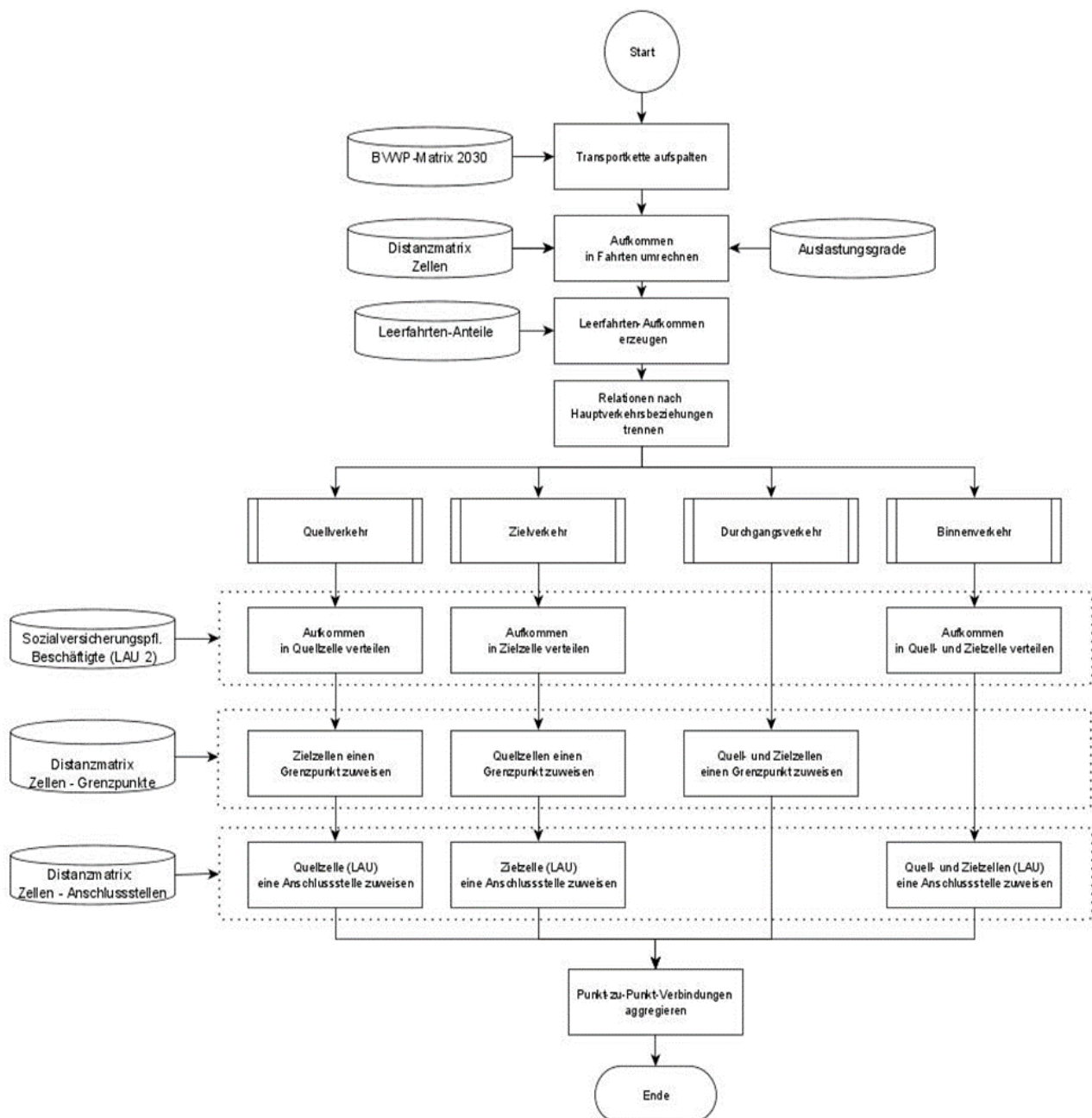


Abbildung 6-7: Vorgehen zur Bereinigung der BVWP-Verflechtungsmatrix  
(Quelle: eigene Darstellung).

In einem **vorbereitenden Arbeitsschritt** werden zunächst die vorliegenden Güterstrom-Transportketten in einzelne Abschnitte zerlegt, indem jeweils für **den Vor-, Haupt-, und Nachlauf ein neuer Datensatz** angelegt wird. Danach werden alle Datensätze entfernt, die ausschließlich anderen Verkehrsarten als dem **Straßenverkehr** zuzurechnen sind. Daran anschließend wird in einem weiteren Arbeitsschritt das Güteraufkommen mit Hilfe der im Methodenhandbuch des BVWP veröffentlichten, durchschnittlichen

---

**Fahrzeugauslastungsgrade** (Tonnen pro Fahrzeug) je NST-Gütergruppe und Entfernungsbereich analog des Vorgehens zur Konversion im BVWP in **Ladungsfahrten** umgerechnet (siehe PTV Group und TCI Röhling 2016). Dies umfasst nur Fahrzeuge mit einer Nutzlast von maximal 3,5 Tonnen.

In einem **dritten Arbeitsschritt** werden dann auf Basis der im vorherigen Arbeitsschritt erzeugten Ladungsfahrten entsprechende **Leerfahrten** berechnet, die auf Basis der veröffentlichten, distanzspezifischen Leerfahrtenanteile ermittelt werden (PTV Group und TCI Röhling 2016). Anschließend werden je Relation die Leer- und Ladungsfahrten aus Vereinfachungsgründen addiert. Eine getrennte Behandlung von Leer- und Ladungsfahrten ist grundsätzlich aber möglich. Schließlich werden die **Datensätze nach Hauptverkehrsbeziehung** getrennt zwischengespeichert (d.h. differenziert nach Quell-, Ziel-, Binnen- und Durchgangsverkehr). In weiteren, voneinander unabhängigen Arbeitsschritten werden dann für jede **Hauptverkehrsbeziehung** statt den **zonal aggregierten Relationen** disaggregierte **Punkt-zu-Punkt-Verbindungen** zwischen generiert. Diese Punkte sind entweder Grenzübergangs- oder Autobahnanschlussstellen und werden im Folgenden auch verallgemeinert als sog. **Netzeinspeiseknoten** bezeichnet.

Für den **Durchgangsverkehr** wird zunächst für jede (ausländische) Zone der geografische Schwerpunkt mit Hilfe eines Geoinformationssystems (hier *ArcGIS*) ermittelt. Anschließend wird jedem dieser Punkte ein **Grenzübergangspunkt als Netzeinspeiseknoten** für das Straßenverkehrsnetzmodell zugeordnet. Zur Ermittlung des nächstliegenden Grenzübergangspunkts wird die kürzeste Luftliniendistanz verwendet. Für die **Quell- bzw. Zielverkehre** werden den ausländischen Zonen nach dem gleichen Schema **Grenzübergangspunkte** zugeordnet.

Für die deutschen Zellen der **Quell- und Zielverkehr** sowie für den **Binnenverkehr** erfolgt dann eine weitere **räumliche Disaggregation der Fahrten**. Dazu wird das Fahrtenaufkommen je Relation (d.h. entweder zwischen einem Grenzübergangspunkt und einer NUTS 3-Einheit oder zwei NUTS 3-Einheiten) auf die **Ebene LAU 1** (Gemeinden) mit Gebietsstand vom 31.12.2010 umgelegt. Zur räumlichen Verortung des Fahrtenaufkommens in einer LAU 1-Einheit wurde der geometrische Schwerpunkt ebenfalls mittels eines Geoinformationssystems bestimmt. Diesem Punkt wird dann das entsprechende Fahrtenaufkommen zugeordnet. Insgesamt existierten zum Stichtag 31.12.2018 ca. 11.500 LAU 1-Einheiten (Bundesagentur für Arbeit 2018).

Als **Umlegungsgröße** für das Fahrtenaufkommen wurden die offiziell gemeldeten **sozialversicherungspflichtigen Beschäftigten** je LAU-Einheit herangezogen, da deren Anzahl auf der Ebene LAU 1 verfügbar ist und überdies diese Kenngröße mit dem Fahrtenaufkommen auf der NUTS 3-Ebene gut korreliert (adjustiertes Bestimmtheitsmaß von 0,78 nach eigener Berechnung). Andere Umlegungsschlüssel sind aber auch denkbar. Dafür eignen sich z.B. gewichtete Indikatoren aus mehreren Variablen, die positiv mit dem Güteraufkommen korrelieren.

---

---

Zur Umlegung des anteiligen Fahrtenaufkommens  $f_{nk}$  wurde folgende Vorschrift verwendet:

$$f_{nk} = \frac{b_{n,i}}{\sum_{n=1}^m B_i} * \frac{b_{k,j}}{\sum_{k=1}^l B_j} * F_{ij} \quad (6-1)$$

Variablenbeschreibung

$b_{n,i}$	Anzahl der sozialversicherungspflichtigen Beschäftigten der LAU 1-Einheit $n$ in NUTS 3-Einheit $i$
$b_{k,j}$	Anzahl der sozialversicherungspflichtigen Beschäftigten der LAU 1-Einheit $k$ in NUTS 3-Einheit $j$
$B_i$	Summe der sozialversicherungspflichtigen Beschäftigten in NUTS 3-Einheit $i$
$B_j$	Summe der sozialversicherungspflichtigen Beschäftigten in NUTS 3-Einheit $j$
$F_{ij}$	jährliches Verkehrsaufkommen zwischen den NUTS 3-Einheiten $i$ und $j$
$f_{nk}$	jährliches Verkehrsaufkommen zwischen den LAU 1-Einheiten $n$ und $k$

Formel 6-1: Ermittlungsvorschrift zur Erzeugung des Fahrtenaufkommens  
(Quelle: eigene Darstellung)

Nach Beendigung der Disaggregation wurden in einem weiteren Datenbereinigungsschritt diejenigen Relationen zweier LAU-Einheiten entfernt, für die keine Fahrten existierten. Die nun entstehende Anzahl an Fahrten belief sich auf **ca. 48,6 Millionen Datensätze**.

Da diese Anzahl an Datensätzen für nahezu jede Simulation und auch jedes Optimierungsmodell eine nur extrem schwer zu verarbeitende Instanzgröße darstellt, wird nun ein Aggregationsschritt vorgenommen. Um Punkt-Zu-Punkt-Verbindungen vorhalten zu können, deren Anzahl jedoch zu begrenzen, werden nun die einzelnen Relationen auf dem Straßenverkehrsnetzmodell bzw. dessen Netzeinspeiseknoten aggregiert. Diese Netzeinspeiseknoten sind, wie erwähnt, einerseits für die LAU-Einheiten die nächstgelegenen **Autobahnanschlussstellen** (kürzeste Distanz im Netzmodell) und andererseits die Grenzübergangspunkte für die Relationen im Quell-, Ziel- und Durchgangsverkehr. Durch diesen Aggregationsschritt entsteht eine Verflechtungsmatrix auf Ebene der Netzeinspeiseknoten als Jahreswerte für 2030 aufgelöst nach Fahrten. Die Anzahl der nun entstehenden Datensätze beträgt **ca. 2,07 Millionen**.

Im hier beschriebenen Verfahren zur Erzeugung von Lkw-Fahrten werden nur **Fahrzeuge** mit einer **Nutzlast von mindestens 3,5 Tonnen** aufgrund der Datenverfügbarkeit für Fahrzeugauslastungsgrade modelliert. Diese Fahrzeugklasse weist gemäß **BVWP-Verflechtungsprognose** eine **Fahrleistung** von etwa **36,7 Mrd. Fzkm** pro Jahr für 2030 auf dem relevanten Teilnetz auf (Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur 2014). Im hier sehr ähnlichen aber notwendigerweise vereinfachten **Vorgehen** wurde eine Jahresfahrleistung von **ca. 33,8 Mrd. Fzkm** auf dem relevanten Teilnetz für 2030 errechnet, was 92% der Fahrleistung des BVWP entspricht. Vor dem Hintergrund der beschränkten öffentlich zugänglichen Datengrundlage zur Aufstellung des BVWP und der im Rahmen dieser Arbeit nur vereinfacht modellierten Straßengüterverkehrsnachfrage kann eine Abweichung von etwa 8% als durchaus akzeptabler Modellfehler gewertet werden.

---

### 6.2.1.2. Auswahl einer Relationsstichprobe

Weil die verbliebenen Datensätze immer noch eine sehr große Instanz darstellen, um in angemessener Zeit durch ein Simulations- und Optimierungsmodell verarbeitet werden zu können, sollte die Menge der Relationen durch Bildung einer Stichprobe beschränkt werden, wenn Rechenzeit und/oder -kapazität beschränkt sind. Hierfür war es notwendig, die Grundgesamtheit aller Relationen näher bezüglich ihrer deskriptiv-statistischen Eigenschaften zu untersuchen.

Neben weiteren statistischen Analysen wurde zu diesem Zweck auf Basis der Pareto-Hypothese auch eine **Analyse der verbliebenen Datensätze** hinsichtlich ihres **Beitrages zur Gesamtanzahl der Fahrten** durchgeführt (Scharpf 2015). Die Lorenzkurve eignet sich hierfür als Visualisierungsinstrument: sie gibt „... die Verteilung der anteiligen Merkmalssumme und somit die relative Konzentration der Merkmalswerte...“ bezogen auf die Anzahl der beobachteten Merkmalsträger wieder (Kohn und Öztürk 2017).

#### Anteil Verkehrsaufkommen

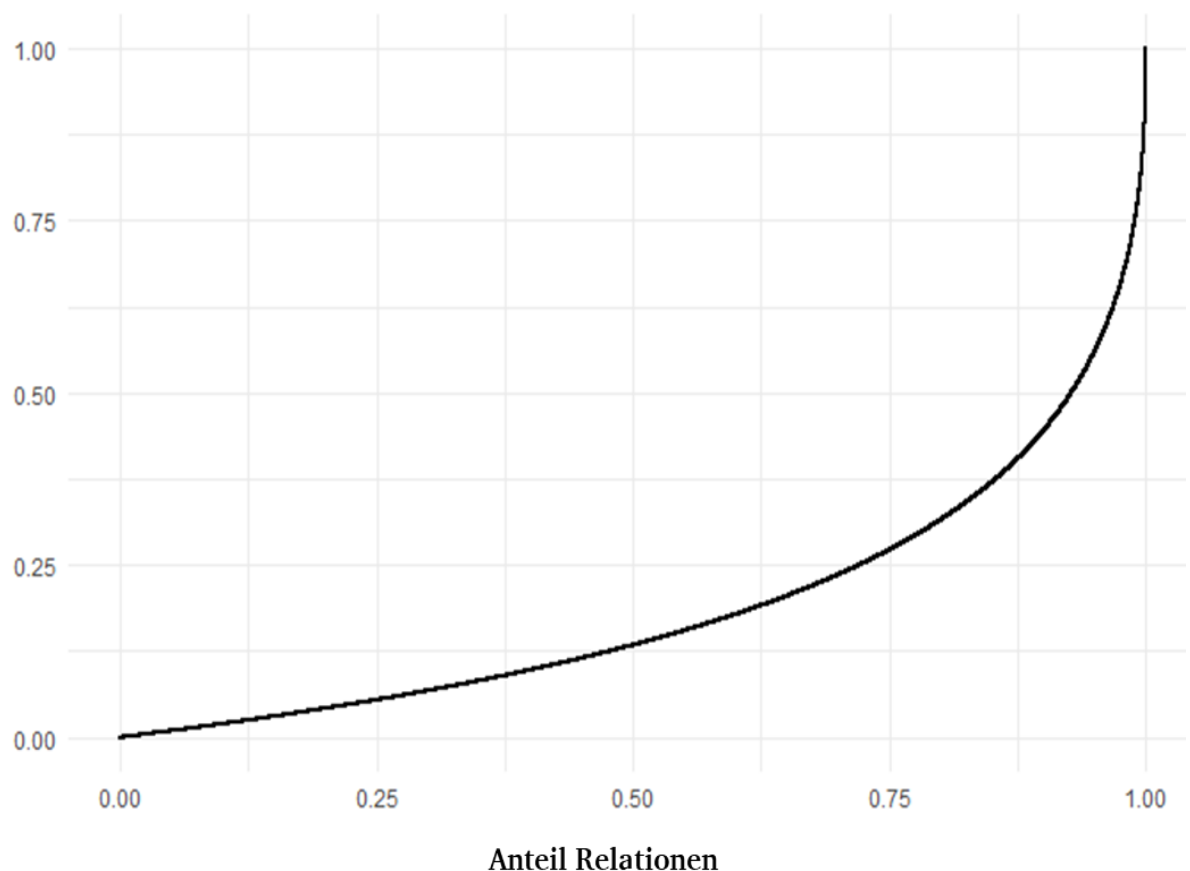


Abbildung 6-8: Lorenzkurve zur Verteilung des Verkehrsaufkommens auf die Relationen, normiert als Summenhäufigkeiten (Quelle: eigene Berechnung).

---

---

In einem ersten Schritt wurden zunächst aus allen Datensätzen diejenigen **Datensätze** selektiert, die mindestens 200 Fahrten pro Jahr aufweisen, also im Durchschnitt mindestens **eine Fahrt pro Modelltag**. Die verbliebene **Selektion von 110.608 Datensätzen** wurde dann aufsteigend nach der Fahrtenanzahl eines jede Datensatzes sortiert und dann die Summenhäufigkeit des Merkmals „Verkehrsaufkommen“ errechnet. Die hierdurch entstehende Lorenzkurve ist in Abbildung 6-8 dargestellt. Die Rohdaten zu dieser Auswertung finden sich in Anlage 3.

Bei Betrachtung der Lorenzkurve ist auffällig, dass sich die Pareto-Hypothese bestätigt. Etwa **50% des Verkehrsaufkommens** (in Fahrten pro Jahr) entfallen auf ca. **90% der Relationen**. Der verbleibende Anteil aller Relationen, etwa 10%, steuern die andere Hälfte des Verkehrsaufkommens bei. Darüber hinaus weisen **75% der Relationen** in Summe nur ca. **25% des Verkehrsaufkommens** auf.

Aus diesem Grund wurden die **64.760 Datensätze** mit den höchsten Verkehrsaufkommen als Relationsstichprobe für diesen Anwendungsfall selektiert (etwa 3% der 2,07 Mio. Eingangsdatensätze oder 58,55% der Datensätze der Selektion). Diese Relationsstichprobe umfasst mit insgesamt ca. 23,25 Mrd. Fzkm pro Jahr etwa **68,8% der gesamten modellierten Fahrleistung**. Die so selektierten Datensätze weisen ein Verkehrsaufkommen von ca. **107,53 Mio. Fahrten** als Jahreswert für 2030 und somit etwa 89,77% des Fahrtenaufkommens der Selektion auf.

Diese Selektion, die hier aufgrund von beschränkten Rechenzeiten und -kapazitäten getroffen worden ist, kann in weiteren Forschungsvorhaben, die auf die hier beschriebene Vorgehensweise zurückgreifen wollen, bei Entfallen der Restriktionen nach eigenem Ermessen oder den Erfordernissen auf Grund der forschungsleitenden Fragestellungen angepasst werden.

### 6.2.2. Fahrzeug- und Systemkonfiguration

Die in den fahrzeugseitig verbauten Energiespeichern mitgeführte Energie (mithin deren Kapazität) auf der einen Seite sowie die Anzahl bzw. Länge der in einem Netz zu errichtenden Ladestationen auf der anderen Seite sind wechselseitig voneinander abhängig. Prinzipiell ist hier also auch eine sehr hohe Anzahl möglicher Parameterkombinationen für die Fahrzeug- und die Infrastrukturseite des *eHighway*-Systems denkbar. Aus diesem Grund werden im folgenden Abschnitt wichtige **fahrzeug- und infrastruktureitige Parameter** für den **Anwendungsfall** auf Basis der Ergebnisse einer Literaturanalyse festgelegt.

Derzeit werden für den Fahrzeugbetrieb im Rahmen des *eHighway*-Systems hybridisierte, mit Stromabnehmern ausgestattete Lkw eingesetzt, die auch als **Oberleitungs-Hybrid-Lkw (OH-Lkw)** bezeichnet werden. Die OH-Lkw verfügen (noch) über einen vergleichsweise kleinen Energiespeicher, jedoch führen sie auch ein Diesellaggregat zur Erzeugung elektrischer Energie während der Fahrt mit. Perspektivisch ist denkbar, dass das im Fahrzeug verbaute Diesellaggregat durch einen größeren Energiespeicher ersetzt wird, womit ein sog. **Oberleitungs-Batterie-Lkw (OB-Lkw)** ohne Dieselmotor als Rückfallebene entsteht (Kühnel *et al.* 2018).

---

Um die Vergleichbarkeit der Aussagen mit anderen Veröffentlichungen zu gewährleisten, erscheint es sinnvoll, **zwei verschiedene Fahrzeug-Kernkonfigurationen** anzunehmen: einen Diesel-Lkw zu Referenzzwecken und einen OH-Lkw in verschiedenen Auslegungen. Die in die weitere Untersuchung eingehenden Parameter für die Fahrzeugkonfigurationen sind in den folgenden Abschnitten aufbereitet worden.

Unabhängig von der jeweiligen Fahrzeugkonfiguration wird eine **mittlere Geschwindigkeit in Beharrungsfahrt** von **80 km/h** auf den Bundesautobahnen angenommen, etwaige belastungsabhängige Geschwindigkeitsreduktionen werden zur Vereinfachung nicht berücksichtigt.

### Fahrzeugkonfiguration Diesel-Lkw

Der **Verbrauch** eines typischen **Diesel-Lkw** im Güterverkehr rangiert derzeit zwischen 33,1 und 35,7 Litern Kraftstoff pro 100 Kilometer in Abhängigkeit des eingesetzten Typs (Norris und Escher, 2017). Bis zum Jahr 2030 wird allerdings im Wege der Umsetzung von Maßnahmen zur Effizienzsteigerung mit einem Rückgang des Durchschnittsverbrauchs auf 27,2 Liter pro 100 km Fahrleistung gerechnet (Kühnel *et al.* 2018, S. 32).

Während der Fahrt emittiert ein mit Dieselmotorkraftstoff betriebener Lkw in Abhängigkeit seines Gewichts (als Summe aus Leergewicht und Zuladung) neben Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) auch Feinstäube (PM<sub>x</sub>) und Stickstoff-Oxide (NO<sub>x</sub>). Aus Gründen der späteren Vergleichbarkeit bzw. der Datenverfügbarkeit werden hier lediglich **CO<sub>2</sub>-Emissionen** berücksichtigt, da für die Vergleichsfahrzeuge noch keine detaillierten Werte hierfür vorliegen. Die lokalen Luftschadstoffemissionen sollen z.B. im Rahmen des ELISA-Feldversuchs in Hessen ermittelt werden (Boltze *et al.* 2020). Die für das Anwendungsbeispiel in der Literatur vorgefundenen **CO<sub>2</sub>-Emissionskennwerte** schwanken je nach Quelle, die hier angesetzten Werte in Tabelle 6-1 stammen sind (Kühnel *et al.* 2018, S. 37) entnommen.

Tabelle 6-1: Fahrzeugkonfiguration Diesel-Lkw  
(Quelle: eigene Darstellung).

Fahrzeugkonfiguration Diesel-Lkw		
Parameter	Einheit	Wert
Verbrauch Diesel	l/km	0,272
Emission CO <sub>2</sub> (WtT)	g/l	0,426
Emission CO <sub>2</sub> (TtW)	g/l	2.658
Emission CO <sub>2</sub> (WtW)	g/l	2.658,426

## Fahrzeugkonfiguration OH-Lkw

Bei einem OH-Lkw können grundsätzlich **drei Betriebsmodi** unterschieden werden: Fahrt mittels Energieentnahme aus dem Energiespeicher (sog. **Batteriemodus**), Fahrt unter der Oberleitung (sog. **Lade- oder Oberleitungsmodus**) und Fahrt mittels erzeugter elektrischer Energie durch den Dieselgenerator (sog. **Dieselmodus**). Die im Modell verwendeten Kenngrößen sind in Tabelle 6-2 festgehalten.

Tabelle 6-2: Fahrzeugkonfiguration OH-Lkw  
(Quelle: eigene Darstellung).

Fahrzeugkonfiguration OH-Lkw				
Parameter	Einheit	OH-Lkw 5	OH-Lkw 175	OH-Lkw 300
Verbrauch Dieselmodus	l/km	0,243		
Verbrauch Oberleitungsmodus	kWh/km	1,2		
Verbrauch Batteriemodus	kWh/km	1,1		
Energiespeicherkapazität	kWh (netto)	5	175	300
CO <sub>2</sub> -Emissionen Dieselmodus	g/l (WtT)	0,426		
	g/l (TtW)	2.658		
	g/l (WtW)	2.658,426		
CO <sub>2</sub> -Emissionen elektrisch	g CO <sub>2eq</sub> /km (WtT)	494		
	g CO <sub>2eq</sub> /km (TtW)	0		
	g CO <sub>2eq</sub> /km (WtW)	494		

Hinsichtlich der Fahrt im **Dieselmodus** existieren abweichende **Verbrauchswerte** im Vergleich zum regulären Diesel-Lkw da durch die Hybridisierung des Antriebsstrangs bzw. Bremsenergie-Rückgewinnung (sog. Rekuperation) eine Verbrauchssenkung erreicht werden kann (Kühnel *et al.* 2018, S. 33). Daher wird der **Diesel-Verbrauch** 24,3 Liter Kraftstoff pro 100 Kilometer angenommen. Für den **Fahrstrom-Verbrauch** ergeben sich Werte zwischen 1,2 kWh/km im Oberleitungsmodus bzw. 1,1 kWh im Batteriemodus (Kühnel *et al.* 2018, S. 33).

Die in OH-Lkw verbauten, kleineren **Energiespeicher** schwanken bei den bisherigen themenbezogenen Veröffentlichungen bezüglich ihrer **Kapazität** (netto, das bedeutet bei Berücksichtigung des zulässigen Hubs). Bisher wurden Fahrzeugkonfigurationen mit Energiespeichern von einer Kapazität zwischen 5 kWh und 300kWh betrachtet (Hacker *et al.* 2020, S. 83ff; Jöhrens *et al.* 2020, S. 31). Hier sollen daher drei Konfigurationen mit 5, 175 und 300 kWh Kapazität untersucht werden.



Die **Emissionskennwerte** für CO<sub>2</sub> ergeben sich beim OH-Lkw im Dieselmotus aus dem Dieselmotusverbrauch pro Kilometer sowie einem Well-To-Tank-Anteil für die Fahrzeugherstellung und den -betrieb. In den elektrischen Modi hingegen ist der TtW-Anteil per Definition der Referenzstudien null, für die Bereitstellung des Fahrstroms der Fahrzeuge fallen unter Verwendung des für 2030 geplanten Strommix noch 494 g CO<sub>2eq</sub>/km an (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit 2017a).

### Systemkonfiguration des *eHighway*

Wenn, wie hier angenommen, Lkw auf den Bundesautobahnen unter Normalbedingungen ca. 80 Kilometer pro Stunde zurücklegen können und Oberleitungs-Lkw mit ausgefahrenem Pantographen ca. 1,2 kWh pro Kilometer für die Traktion umsetzen, ergibt sich ein Leistungsbedarf von etwa 130 kW um allein den Traktionsenergieverbrauch eines Fahrzeugs zu decken. Soll während des Unterfahrens einer Oberleitungs-Ladestation zusätzlich noch ein im Fahrzeug verbauten Energiespeicher geladen werden, muss die vorgehaltene elektrische **Dauerleistung** also höher sein. Gleiches gilt, wenn die Anzahl der die Station gleichzeitig benutzenden Fahrzeuge steigt. Aus diesen Gründen sind in der Literatur drei mögliche *eHighway*-Systemkonfigurationen vorgeschlagen worden: eine Basiskonfiguration, eine Leistungskonfiguration und eine Hochleistungskonfiguration (Kühnel *et al.* 2018, S. 101ff)

Die **Systemkonfiguration** wirkt sich einerseits auf **elektrotechnische Kennwerte** wie die installierte **Dauerleistung** und damit die dem **Fahrzeug zuführbare Energiemenge** pro Zeiteinheit aus. Andererseits beeinflussen verschiedene **Systemauslegungen** auch die **Investitionskosten** in die Ladeinfrastruktur. Das ***eHighway*-System** kann aus diesem Grund flexibel je nach **Anwendungsfall konfiguriert** werden, wie aus Tabelle 6-4 hervorgeht (Kühnel *et al.* 2018, S. 105).

Tabelle 6-3: Technische Ausgestaltungsmöglichkeiten der Ladeinfrastruktur  
(Quelle: in Anlehnung an Kühnel *et al.* 2018, S. 105).

<i>eHighway</i> -Systemkonfigurationen				
Parameter	Einheit	Basis	Leistung	Hochleistung
Dauerleistung je Fahrtrichtung	kW/km	500	1.000	2.000
Systemspannung (Nennspannung)	V <sub>DC</sub>	750	750	1.500
Fahrzeuganzahl	Stk./km	2	4	8
Verbrauch Traktionsleistung	kW/Fz	130	130	130
Ladeleistung	kW/Fz	120	120	120
Investitionskosten (2 Richtungen)	Mio. EUR/km	1,7	2,6	3,0

---

Die häufig in Studien betrachtete **Basis-Konfiguration** einer *eHighway*-Ladestation geht von einer installierten Dauerleistung von 500 kW pro Kilometer und Fahrtrichtung aus (Kühnel *et al.* 2018, S. 105). Davon werden 130 kW für die Traktion eines Fahrzeugs benötigt während 270 kW zur Aufladung des im Fahrzeug mitgeführten Energiespeichers verwendet werden können. Bezogen auf eine Minute Aufenthalt unter einer Oberleitungs-Ladestation können also 4,5 kWh von einem Fahrzeug bezogen werden, dies halbiert sich auf 2,25 kWh bei zwei beziehenden Fahrzeugen und *vice versa* für weitere Fahrzeuge. Im Falle der **Leistungs- und Hochleistungs-Konfiguration** können die Werte linear mittels der Basiskonfiguration extrapoliert werden. Im Rahmen des in Kapitel 5 beschriebenen Verfahrens wird zunächst mit einer **Basiskonfiguration** begonnen, die bei einer entsprechenden Verkehrsnachfrage **automatisch** zu einer der **leistungsfähigeren Konfigurationen aufgewertet** wird. Dieses Vorgehen stellt somit eine Verfeinerung des Vorgehens (ein pauschaler Kostensatz je Ausbaustufe) in Hacker *et al.* 2020 dar.

### 6.2.3. Weitere Datenquellen

Für das Anwendungsbeispiel wird als **Verkehrsangebotsmodell** das routingrelevante Bestandsnetz der Bundesautobahnen zum Stichtag 01.01.2019 in Form eines Graphen verwendet. Das resultierende Verkehrsnetz ist in Abbildung 6-9 auf der folgenden Seite dargestellt. Zu diesem Zeitpunkt hatte das deutsche Autobahnnetz eine Länge von ca. 13.100 km (Statistisches Bundesamt 2019). Diese sind komplett im Verkehrsangebotsmodell berücksichtigt, hinzu kommen noch ca. 615 km Bundesstraßen um routingrelevante Lückenschlüsse zu ermöglichen. Die modellierten Kanten des Netzwerkgraphen, die aus dem DLM250 entnommen worden sind, weichen insgesamt nur um ca. 1% von stichprobenartig gemessenen Längen ab (o.A. 2020a).

Zwar wird dieses Anwendungsbeispiel mit einer Verkehrsnachfrage des Basisjahres 2030 gerechnet, allerdings bestand zum Zeitpunkt der Verfassung dieser Arbeit kein Zugriff auf ein umfassendes Verkehrsangebotsmodell bzw. entsprechende historische Netzdaten für eine Rekonstruktion. Die Abweichung der gesamten Netzlänge der Bundesautobahnen zwischen den Jahren 2015 und 2030 beträgt allerdings auch lediglich 899 km, was einer Abweichung von ca. 6,5% entspricht (Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur 2016, S. 38). Zudem entsteht der Zuwachs der Netzlänge im Bundesautobahnnetz auch aus Umwidmungen bestehender Bundesstraßen, die bereits im hier verwendeten Verkehrsangebotsmodell berücksichtigt sind.

Die räumlichen Daten zu den **Autobahn-Anschlussstellen** (Punktdaten) sowie die zu den LAU und **NUTS 3-Einheiten** (Polygone) wurden dem *Amtlichem Topographisch-Kartographischen Informationssystem* (ATKIS) entnommen. Die verwendeten Anschlussstellen und NUTS 3-Einheiten sind in Abbildung 6-10 dargestellt. Diejenigen NUTS 3-Einheiten ohne eine Anschlussstelle sind dort hervorgehoben worden. Die verwendeten Geodaten können über das Dienstleistungszentrum des Bundes für Geoinformation und Geodäsie bezogen werden. (o.A. 2020a).

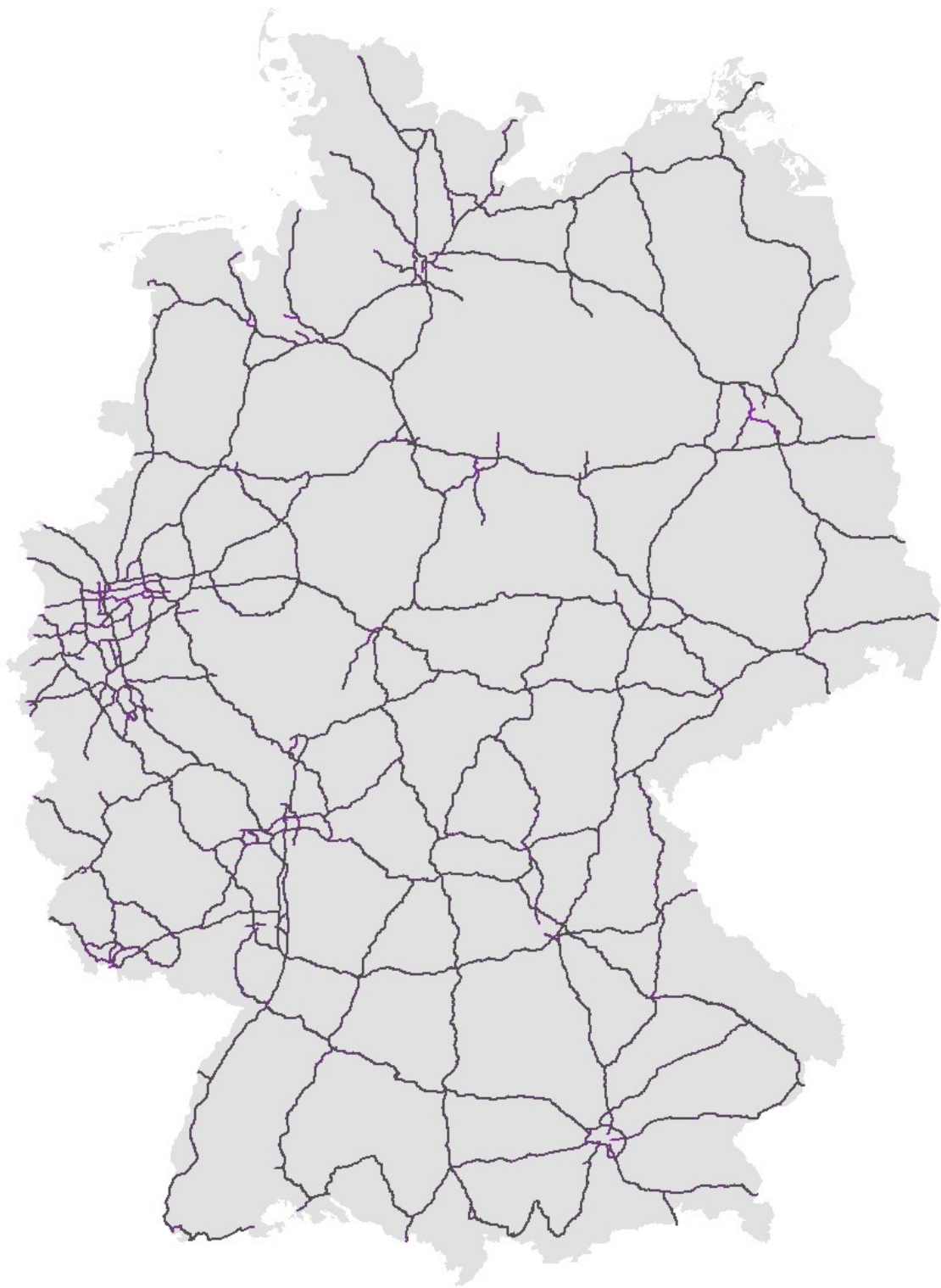


Abbildung 6-9: Bereinigtes Verkehrsnetzmodell  
(Quelle: eigene Darstellung).

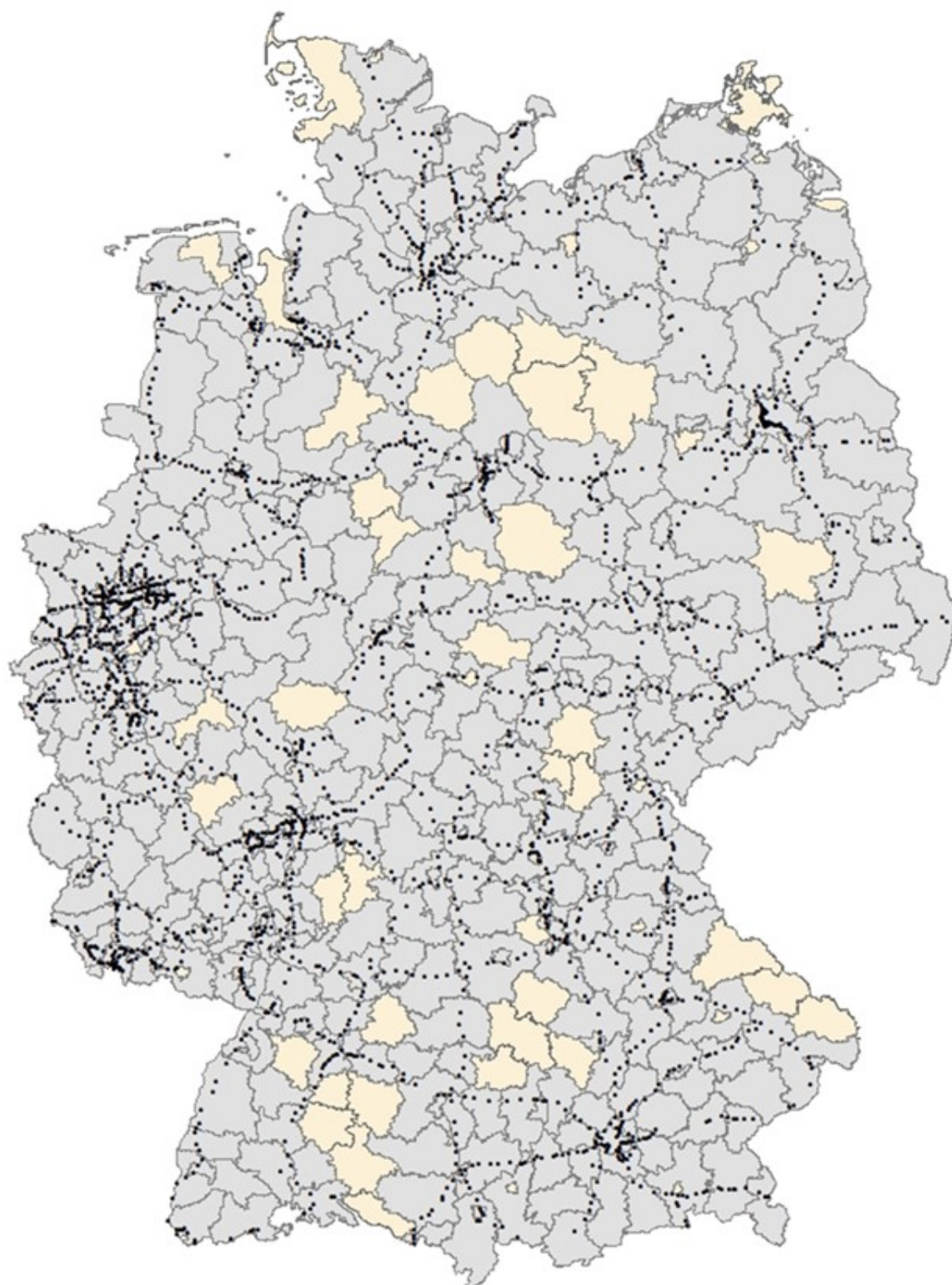


Abbildung 6-10: Verteilung der Autobahn-Anschlussstellen auf NUTS 3-Einheiten  
(Quelle: eigene Darstellung).



#### 6.2.4. Anwendungsfallspezifische Annahmen

Wie in Abschnitt 5.4 beschrieben, war es zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit nicht möglich, das entwickelte Verfahren zur Infrastrukturbewertung einer Anwendung zuzuführen. Hinsichtlich des Anwendungsfall *eHighway* in Deutschland wird aus diesem Grund unterstellt, dass die bauliche **Ausstattungs-fähigkeit** eines jeden im Grundsatz **Streckenelements gegeben** ist. Eine Ausstattung mit *eHighway*-Systemkomponenten ist zu einem *ex ante* **festgelegten Kostensatz je Kilometer** möglich. Durch die Wahl der Simulation als Untersuchungsmethode wird zudem eine dynamische Anpassung des Kostensatzes in Abhängigkeit der Verkehrsnachfrage einer Ladestation möglich. Dies hat die positive Folge, dass die Ergebnisse des Anwendungsfalls auch prinzipiell mit der vorhandenen Literatur vergleichbar sind. Zudem wird aus demselben Grund unterstellt, dass bei der Errichtung einer Ladestation beide Fahrtrichtungen einer gesamten Teilstrecke mit *eHighway*-Systemkomponenten ausgestattet werden. Darüber hinaus können die in der Literatur vorgeschlagenen Leistungsstufen des *eHighway* aus elektrotechnischer Sicht berücksichtigt werden (siehe auch Abschnitt 6.2.2).

Die Modellberechnungen wurden auf einem handelsüblichen Rechner mit beschränkten Rechen- und Zwischenspeicherkapazitäten durchgeführt. Aus diesem Grund wurde die Anzahl der Datensätze, die zur Ableitung einer Netzkonfiguration herangezogen werden begrenzt. Dazu wurden die Relationen nach dem jeweiligen Fahrtenaufkommen absteigend sortiert und die **64.760 Datensätze** mit dem **größten Fahrtenaufkommen** wurden zur Berücksichtigung im Modell gewählt.

Zur **Berechnung der auswertungsrelevanten Kenngrößen**, beispielsweise der vermiedenen Emissionen von Kohlenstoffdioxid, wurde dann die gefundene, bestmögliche Netzkonfiguration im reinen Simulationsmodus von OAASEE (d.h. nur ein Simulationsexperiment ohne Berücksichtigung der Optimierungskomponente) verwendet. Dies erfolgte unter **Nutzung der gesamten, berücksichtigten Verkehrsnachfrage** (d.h. 64.760 Datensätze) für diesen Anwendungsfall.

Tabelle 6-4: Unterstellter initialer Ladestand des Energiespeichers in kWh  
(Quelle: eigene Darstellung).

Referenz-fahrzeug	Anschluss-stelle	Grenzüber-gangspunkt
OH-Lkw 5	0	0
OH-Lkw 175	145	0
OH-Lkw 300	270	0

Bezüglich der **Routensuche** innerhalb des Verkehrsnetzmodells wird das gesamte Fahrtenaufkommen auf den **distanzminimalen Pfad** zwischen den beiden Knoten einer Relation umgelegt. Die Routensuche erfolgt dabei unter ausschließlicher **Nutzung des Autobahnnetzes bzw. ergänzender Teile des Bundesstraßennetzes** für routingrelevante Lückenschlüsse. Bezüglich des initialen Ladestandes des im unterstellten Referenzfahrzeuges verwendeten Energiespeichers wird ein **vorlaufbedingter Abschlag** unterstellt (siehe Tabelle 6-4). Dieser Abschlag entsteht dadurch, dass das Referenzfahrzeug zunächst

zwischen dem ursprünglichen Aufkommenspunkt (z.B. einem geometrischen Zentrum einer LAU-Einheit) und dem eigentlichen Netzeinspeiseknoten in das hier verwendete Verkehrsnetzmodell (z.B. einer Autobahnanschlussstelle) eine bestimmte Strecke zurücklegen muss. Hierzu wurde eine **Fahrtweite** von durchschnittlich **27,3 Kilometern** im untergeordneten Netz auf Basis einer Analyse der Vorlaufängen angesetzt, was bei einem Verbrauch von 1,1 kWh je Kilometer dann einem Abschlag von 30 kWh entspricht. Hierbei wurde im Fall des OH-Lkw 5 in Folge dessen ein entleerter Energiespeicher unterstellt (unter Berücksichtigung des zulässigen Hubs). Im Falle von Grenzübergangspunkten wird die Energiemenge im Energiespeicher ebenfalls als vollständig entnommen angenommen.

Im Rahmen dieser Untersuchung wird außerdem festgesetzt, dass bei Berechnung von tagesscharfen Werten ein **Tagesteiler von 250** verwendet wird. Eine Verteilung von Fahrten auf Stunden-Zeitscheiben erfolgt im Rahmen einer Gleichverteilung auf **16 Betriebsstunden pro Tag**.

Würden alle **Kanten** des Verkehrsnetzmodell in der **Basiskonfiguration** ausgestattet, würden hierfür **Kosten** von ca. **23,3 Mrd. EUR** entstehen. Würde dies mit der **Leistungskonfiguration** geschehen, fielen hierfür ca. **35,7 Mrd. EUR** an während für die **Hochleistungskonfiguration** etwa **41,2 Mrd. EUR** aufgewendet werden müssten, wie in Abbildung 6-11 wiedergegeben. Die **obere Kostengrenze** aus Hacker et. al 2020, S. 85 für das dort vorgeschlagene Streckennetz von ca. 3.800 Kilometern Länge etwa **12,2 Mrd. EUR**, was einem Kostensatz von ca. 3,15 Mio. EUR pro Kilometer entspricht. Würden alle im Rahmen der Verkehrsumlegung von **OAASEE** befahrenen Segmente ausgestattet, ergibt sich ein notwendiges **Ausbaubudget von ca. 32,4 Mrd. EUR**. Vor dem Hintergrund des breiteren Modellscope in dieser Arbeit (mehr Hauptverkehrsbeziehungen und Relationen) und der verschiedenen Energiespeicher-Kapazitäten, die wiederum den notwendigen Streckenausstattungsgrad determinieren, wird mit einem variablen **Ausbaubudget von 32,4 Mrd. EUR** für den OH-Lkw 5 bzw. **25 Mrd. EUR** für den OH-Lkw 175 sowie für den **OH-Lkw 300** gerechnet.

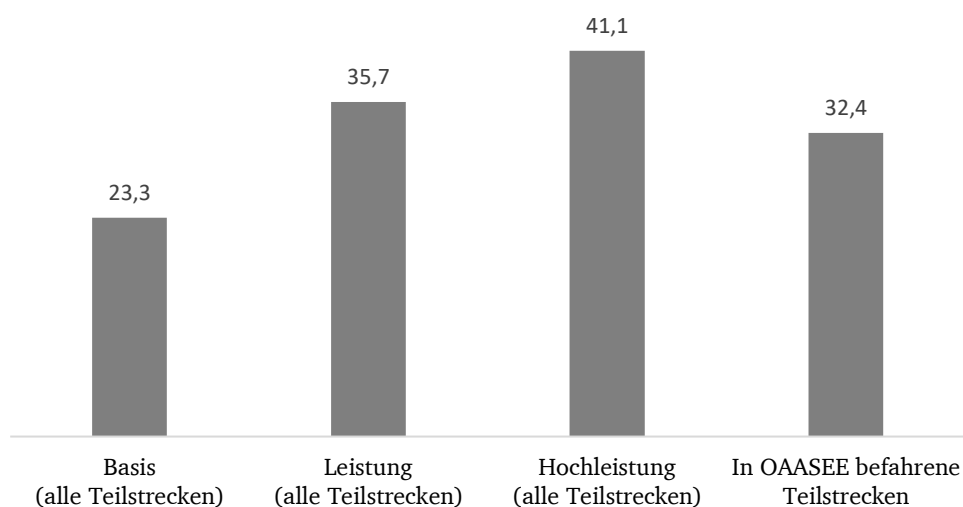


Abbildung 6-11: Ausbaukosten bei Vollaussattung des jeweiligen Stationstyps (in Mio. EUR)  
(Quelle: eigene Darstellung).

---

### 6.3. Modellanwendung

Durch den modularen Aufbau des Modells OAASEE ist es möglich, eine **Reihe unterschiedlicher, verwandter Fragestellungen** hinsichtlich des Fallbeispiels *eHighway* in Deutschland oder anderer Fallbeispiele zu untersuchen. In diesem Abschnitt wird die **Anwendung des Modells** zur Beantwortung einer dieser Fragestellungen **dokumentiert**. Anknüpfend an die bestehende Erkenntnislage in Bezug auf den *eHighway* in Deutschland wird im Rahmen der beispielhaften Modellanwendung die Frage untersucht, welchen **Ausstattungsgrad mit Oberleitungen** die deutschen Autobahnen aufweisen müssten, damit sich eine maximale Reduktion an Kohlenstoffdioxid-Emissionen im Jahr 2030 einstellt. Zudem ist die geographisch-räumliche **Verortung von Ladestationen** von besonderem Interesse.

Zu diesem Zweck wird einerseits die im vorangegangenen Abschnitt beschriebene Datengrundlage hinsichtlich der **Verkehrsnachfrage für das Jahr 2030** genutzt (64.760 Datensätze). Andererseits werden die definierten **Musterfahrzeuge** sowie die **drei Leistungsstufen des eHighway** verwendet. Mit Hilfe der Szenario-Technik (Götze 1993) werden auf dieser Basis bestimmte Parameterkombinationen festgelegt, die einerseits die infrastrukturseitigen Komponenten des *eHighway*-Systems und andererseits die Fahrzeuge beschreiben. Diese unterschiedlichen Parameterkombinationen bilden dann ein **Szenario**, das mit Hilfe gekoppelten Simulations- und Optimierungsmodell OAASEE untersucht wird (siehe auch Anhang 3).

Zunächst wird der modellseitige **Referenzfall** ermittelt, die Güterverkehrsnachfrage wird für das Jahr 2030 ohne *eHighway*-System in Deutschland abgewickelt, d.h. mit dem Dieselmotor als vorherrschende Antriebstechnologie. Gegenüber diesem Referenzfall lassen sich die Ergebnisse der weiteren Szenarien dann spiegeln.

Das **erste Szenario** schreibt die bestehende Situation bezüglich der *eHighway*-Fahrzeugauslegung in die Zukunft fort: fahrzeugseitig wird ein **OH-Lkw** mit relativ **kleinem Energiespeicher** (5 kWh netto) angenommen. Hier können also nur sehr kleine Lücken ohne Oberleitungs-Infrastruktur überbrückt werden, *de facto* entsteht also ein flächendeckendes Netz. Das **zweite Szenario** umfasst ein Musterfahrzeug mit größerem Energiespeicher, der Energiespeicher enthält hier **175 kWh** (netto), es wird jedoch immer noch ein Diesellaggregat mitgeführt. Im **dritten Szenario** wird ebenfalls ein **OH-Lkw** unterstellt, der mit einem vergleichsweise großen **Energiespeicher** mit einer Größe von **300 kWh** (netto) ausgestattet ist.

Diese **Fahrzeugvarianten** sind mit den unterstellten **Konfigurationen** in Wietschel et al. (2017) und Hacker et al. (2020) vergleichbar. Mit dieser Szenarien-Festlegung soll eine **grundlegende Vergleichbarkeit** der Ergebnisse ermöglicht werden. Die Ladestations-Konfigurationen werden in jedem Szenario verkehrsnachfrageabhängig angepasst. Die **Routenwahl** bzw. **Verkehrsumlegung** im Modell OAASEE erfolgen nach dem Bestwegverfahren (Distanz) zwischen den Quell- und den Ziel-Netzeinspeiseknoten einer jeden Relation (siehe auch Anhang 3). Dieses Routing verändert sich nicht zwischen den betrachteten Szenarien, da keine belastungsabhängige, erneute Routensuche modelliert wird.

In den folgenden Abschnitten werden nun die **Ergebnisse der Modellanwendung** für die einzelnen Szenarien beschrieben, abschließend werden diese zusammengeführt und ergänzende Untersuchungen beschrieben.

---



### 6.3.1. Referenzfall: Diesel-Lkw

Im **Straßengüterverkehr** sind **Dieselmotore** derzeit die **dominierende Antriebstechnologie**, bei Sattelzugmaschinen lag deren Anteil an allen verfügbaren Antriebstechnologien im Jahr bei über 99% (Kraftfahrt-Bundesamt 2017). Die Technologie zeichnet sich durch einen hohen Reifegrad, eine hohe Zuverlässigkeit und ein annähernd lückenloses Versorgungsnetzwerk aus. Dieseldieselfkraftstoff wird aus fossilen Ressourcen hergestellt dessen Verbrennung mit relativ hohen Treibhausgasemissionen pro Volumeneinheit und lokalen Luftschadstoffemissionen verbunden ist (Jöhrens *et al.* 2020, S. 27ff). Da die **Reduktion von Treibhausgasemissionen** sowie die **Vermeidung von lokalen Schadstoffemissionen** erklärte **politische Ziele** sind, dienen die Diesel-Lkw als Referenz für den Vergleich zu den OH-Lkw.

Die für diese Untersuchung angesetzten **Werte**, die das **Diesel-Referenzfahrzeug** charakterisieren, wurden in Abschnitt 6.2.2 auf Basis einer Literaturanalyse definiert. Sie unterstellen bereits die Implementierung einiger **Effizienzsteigerungsmaßnahmen**, deren Umsetzung bis 2030 weitgehend bei allen Fahrzeugen im Bestand erreicht werden soll (Hacker *et al.* 2020, S. 79). Eine Übersicht der Ergebnisse für den Diesel-Referenzfall zeigt Tabelle 6-5.

Tabelle 6-5: Übersicht der Ergebnisse des Referenzfalls für alle Kenngrößen  
(Quelle: eigene Darstellung).

Kenngröße	Einheit	Wert
<b>Fahrleistung Diesel</b>	Mrd. Fzkm/Jahr	23,25
	Mio. Fzkm/Tag	93,02
<b>Fahrleistung Elektrisch</b>	Mrd. Fzkm/Jahr	0
	Mio. Fzkm/Tag	0
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>	Mio. t/Jahr	16,82
	Mio. t/Tag	0,07

### Ergebnisse

In den vier Szenarien wird jeweils eine **Gesamtfahrleistung von ca. 23,25 Mrd. Fzkm** für das Jahr 2030 im Modell OAASEE auf Grundlage der berücksichtigten 64.760 Relationen erbracht. Die Verteilung dieser Verkehrsströme auf dem modellierten Netz zeigt Abbildung 6-12. Die **tägliche Fahrleistung** entspricht also bei einem hier angenommenen Umrechnungsfaktor vom Jahres- auf einen Tageswert von 250 einer durchschnittlichen Tages-Fahrleistung von etwa **93,02 Mio. Fzkm**. Diese Fahrleistungs-Kennwerte ändern sich zwischen den Szenarien wegen der fixierten Verkehrsumlegung auf Basis einer Bestweg-Routensuche nicht mehr.

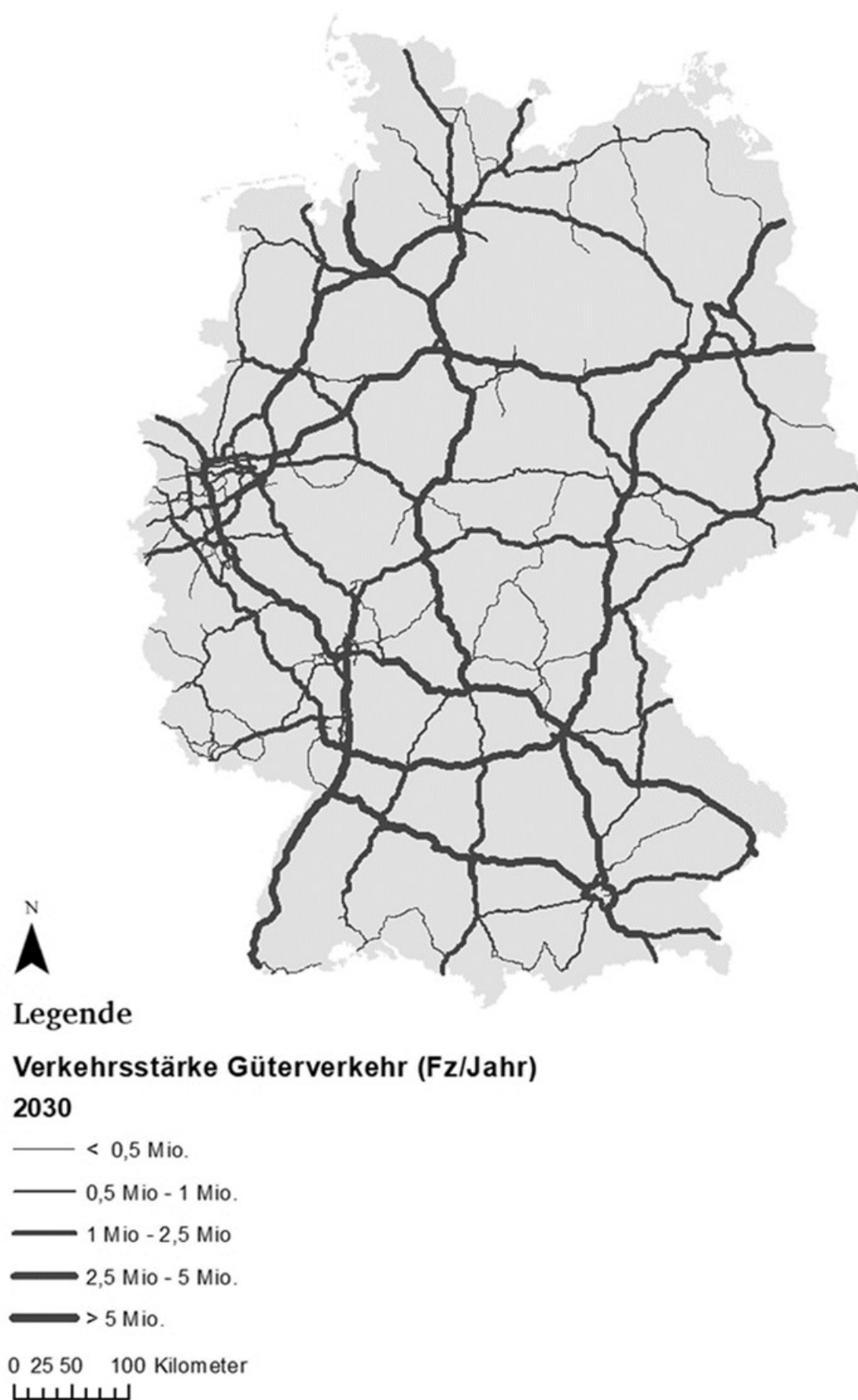


Abbildung 6-12: Jährliche Verkehrsstärke (Fz/Jahr, 2030) im Diesel-Referenzfall  
(Quelle: eigene Darstellung).

In Abbildung 6-12 ist zu erkennen, dass die am stärksten nachgefragten Netzabschnitte die **Autobahnen** mit den einstelligen **Ordnungsnummern A1 bis A9** sowie einige zusätzliche Zubringeräste sind. So wird z.B. die Autobahn A1 zwischen Fehmarn und Lübeck bzw. zwischen Lübeck und Hamburg wegen des verstärkten Güteraustauschs mit Skandinavien über die feste Fehmarnbeltquerung belastet, der in der Güterstrom-Prognose für 2030 vorhergesagt worden ist. Die traditionellen **Nord-Süd-Transitautobahnen A5 und A7** zählen ebenfalls zu den stärker belastetsten Teilnetzausschnitten.

In **West-Ost-Richtung** sind die Autobahnen A2 und A3 bzw. A6 und A8 von einer hohen Verkehrsnachfrage gekennzeichnet. Auch die Autobahnen A11 und A12 sind wegen des unterstellten zunehmenden Güteraustausches mit Polen bzw. den baltischen Staaten recht hoch belastet. Dies wirkt sich auch auf die Autobahn A9 als Bindeglied in Nord-Süd-Richtung aus. Ebenfalls stark nachgefragt ist die Autobahn A27 als Verbindung zwischen Bremerhaven und Bremen wegen des prognostizierten Seeverkehrswachstums.

Tabelle 6-6: Übersicht der Ergebnisse von BVWP, Roadmap OH-Lkw und OAASEE für den Diesel-Referenzfall  
(Quelle: Werte entnommen aus Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur 2014 und Jöhrens et al. 2020).

Kenngröße	Einheit	BVWP	Roadmap OH-Lkw	OAASEE
<b>Fahrleistung</b>	Mrd. Fzkm/Jahr	36,70	41,00	23,25
	Mrd. Fzkm/Tag	0,15	0,16	0,09
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen (WtW)</b>	Mio. t/Jahr	k.A.	32,7	16,82
	Mio. t/Tag	k.A.	0,1635*	0,07

\*eigene Berechnung

\*\* zonale Aggregation: NUTS 3

\*\*\* zonale Aggregation: LAU 1

Im **BVWP 2030** wird für schwere und leichte Lkw eine territoriale **Fahrleistung** von insgesamt **99,7 Mrd. Fzkm** für das Jahr 2030 für alle Hauptverkehrsbeziehungen prognostiziert (Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur 2014, S. 311ff). Davon entfallen nur etwa **36,7 Mrd. Fzkm auf die schweren Nutzfahrzeuge** und 63 Mrd. Fzkm auf leichte Lkw mit einer Nutzlast von maximal 3,5 Tonnen. Bei den 250 im BVWP unterstellten Betriebstagen im Straßengüterverkehr ergibt sich eine Fahrleistung von durchschnittlich 146,9 Mio. Fzkm pro Tag für schwere Lkw und rund 252 Mio. Fzkm pro Tag für leichte Nutzfahrzeuge. Die **CO<sub>2</sub>-Emissionen** werden nur auf Ebene des gesamten **Straßengüterverkehrs** ausgewiesen, entsprechend differenzierte Kennwerte waren bei Fertigstellung dieser Arbeit nicht verfügbar.

Im **Projekt Roadmap OH-Lkw** wurde für den Prognosezeitpunkt 2030 eine Jahres-Gesamtfahrleistung von 72,8 Mrd. Fzkm für schwere Nutzfahrzeuge errechnet (Jöhrens et al. 2020, S. 40). Dieser Wert bezieht sich allerdings nur auf den deutschen Binnenverkehr, die anderen Hauptverkehrsbeziehungen wurden vernachlässigt. Davon entfallen nach einer Bewertung der sog. „Logistikaffinität“ etwa 41 Mrd. Fzkm auf potentiell durch OH-Lkw bedienbare Relationen auf den relevanten Netzabschnitten. Diese

---

Filterkriterien weichen aber von den hier verwendeten Kriterien ab, ebenso wie die unterstellte Fahrzeuggrundlage.

Im **Modell OAASEE** ist wegen der Verwendung von Dieseldieselkraftstoffen mit der Erbringung der gesamten berücksichtigten Jahres-Fahrleistung (Sattelzüge über 26 Tonnen) für 2030 eine **Freisetzung von ca. 16,82 Mio. Tonnen Kohlenstoffdioxid** verbunden. Bei dieser Berechnung ist der mittlere Emissionskennwert (WtW) des Referenzfahrzeuges angesetzt worden (2658,426 Gramm je Kilometer). Pro Modelltag entspricht dies durchschnittlich etwa 0,0932 Mio. Tonnen (WtW). Im Falle einer **Tank-To-Wheel-Betrachtung** reduziert sich die umgesetzte Menge nur unwesentlich auf 16,81 Mio. Tonnen Kohlenstoffdioxid im Jahr 2030.

#### Kohlenstoffdioxid-Emissionen (in Mio. Tonnen pro Jahr)

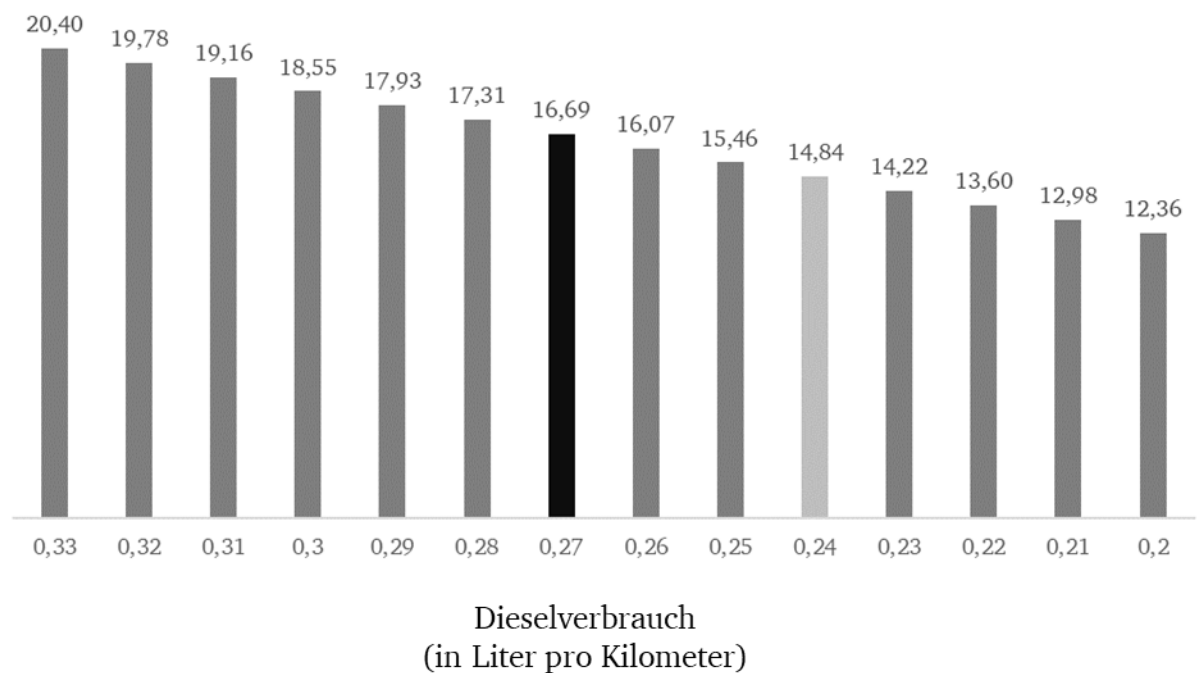


Abbildung 6-13: Variation der Ergebnisse des Referenzfalls für die Kohlenstoffdioxid-Emissionen, in Mio. Tonnen pro Jahr, 2030, WtW (Quelle: eigene Darstellung).

Bei gegebener Fahrleistung können die **Kohlenstoffdioxid-Emissionen in Abhängigkeit** des unterstellten **Fahrzeug-Verbrauchskennwerts** von Diesel je Kilometer variiert werden. Die **Ergebnisse** dieser **Sensitivitätsanalyse** sind in Abbildung 6-13 dargestellt. Wird ein Wert nahe des hier angesetzten mittleren Verbrauchskennwerts (0,272 l/km) zur Berechnung verwendet, ergeben sich in diesem Fall ca. 16,69 Mio. t CO<sub>2</sub> pro Jahr. Bei Verwendung eines oberen Verbrauchskennwertes von 0,33 l/km werden ca. 20,40 Mio. t CO<sub>2</sub> pro Jahr freigesetzt. Am unteren Ende des Untersuchungsintervalls des Verbrauchskennwerts wurde mit einem Verbrauch von 0,2 Litern je Kilometer gerechnet, was zur Freisetzung von 12,36 Mio. Tonnen Kohlenstoffdioxid führen würde. Im Falle des Verbrauchskennwerts des hybridisierten OH-Lkw mit ca. 0,24 Litern je Kilometer ergeben sich dann etwa 14,84 Mio. Tonnen Kohlenstoffdioxid. Die **Kohlenstoffdioxid-Einsparpotentiale** hängen also unmittelbar linear mit dem

---

unterstellten Dieselverbrauch zusammen, was wiederum Auswirkungen auf eine volkswirtschaftliche Kosten-Nutzen-Bewertung haben kann.

### 6.3.2. Ergebnisse Szenario OH-Lkw 5

Das **Szenario OH-Lkw 5** ist hinsichtlich des unterstellten Musterfahrzeuges von der Annahme gekennzeichnet, dass der Energiespeicher im Fahrzeug **mit 5 kWh** relativ klein dimensioniert ist. Daneben verfügt das Fahrzeug über ein Dieselaggregat zur Umwandlung von Dieselkraftstoff in elektrische Energie. Somit können einerseits kleine Lücken im Oberleitungsnetz überbrückt werden. Andererseits müssen aber weite Teile des Vor- und Nachlaufs im Dieselmodus abgewickelt werden. Die Simulationsparameter, die dieses Szenario beschreiben, sind in Tabelle 6-7 festgehalten worden.

Tabelle 6-7: Modellparameter für das Szenario OH-Lkw 5  
(Quelle: eigene Darstellung).

Infrastrukturkonfiguration				
Parameter	Einheit	Basis	Leistung	Hochleistung
Dauerleistung je Fahrtrichtung	kW/km	500	1.000	2.000
Nenn-Systemspannung	V <sub>DC</sub>	750	750	1.500
Fahrzeuganzahl	Stk. /km	2	4	8
Traktionsleistung	kW/Fz.	130	130	130
Ladeleistung	kW/Fz.	120	120	120
Investitionskosten (2 Richtungen)	Mio. EUR/km	1,7	2,6	3
Fahrzeugkonfiguration				
Parameter	Einheit	Wert		
Verbrauch Dieselmodus	l/km	0,243		
Verbrauch Oberleitungsmodus	kWh/km	1,2		
Verbrauch Batteriemodus	kWh/km	1,1		
Emission CO <sub>2</sub> Dieselmodus	g CO <sub>2eq</sub> /km (WtW)	820		
Emission CO <sub>2</sub> Strommodi	g CO <sub>2eq</sub> /km (WtW)	494		
Energiespeicherkapazität	kWh (netto)	5		
Ausbaubudget	Mio. EUR	32.400		

---

In Bezug auf die Oberleitungsinfrastruktur kann wegen des kleinen Energiespeichers im Modellfahrzeug bereits *ex ante* bei erwartungstreuem Modellverhalten davon ausgegangen werden, dass hier der **höchste Streckenausstattungsgrad** zu beobachten sein wird. Somit stellt das **Szenario** eine **obere Schranke** in Bezug auf den Streckenausstattungsgrad mit Oberleitungen dar. Während Verkleinerungen des Energiespeichers vermutlich nicht mehr vorgenommen werden können, sollten weitere Steigerungen der mitgeführten Energiemenge senkend auf den Streckenausstattungsgrad wirken.

In Bezug auf die Oberleitungsinfrastruktur kann wegen des kleinen Energiespeichers im Modellfahrzeug bereits *ex ante* davon ausgegangen werden, dass hier die **höchsten Anforderungen** an den **Streckenausstattungsgrad** mit Oberleitungen gestellt werden. Somit stellt das **Szenario** eine **obere Schranke** in Bezug auf den Streckenausstattungsgrad mit Oberleitungen dar. Während Verkleinerungen des Energiespeichers vermutlich nicht mehr vorgenommen werden können, sollten weitere Steigerungen der mitgeführten Energiemenge senkend auf den Streckenausstattungsgrad wirken.

## Ergebnisse

Im Szenario mit dem OH-Lkw 5 werden **98,98 % der Fahrleistung** in den **elektrischen Fahrzeugbetriebsmodi** erbracht, was etwa **23,02 Mrd. Fzkm** unter Strom für das Jahr 2030 bedeuten würde. Die verbliebenen 1,02 % der Fahrleistung (oder 236,31 Mio. Fzkm) werden vornehmlich auf als nicht ausstattungsfähig angenommenen Teilstrecken zurückgelegt. Diese Teilstrecken ergänzen das Autobahnnetz durch Lückenschlüsse und gehören zum Bundesstraßennetz. Perspektivisch könnten diese aber auch ausbaufähig gemacht werden. Die elektrische Fahrleistung ist in Abbildung 6-15 auf der folgenden Seite als Karte räumlich dargestellt.

Es zeigt sich, dass erwartungsgemäß ein **hoher Streckenausstattungsgrad** im Szenario des OH-Lkw 5 vorliegt, der durch die geringe, fahrzeugseitig mitgeführte Energiemenge bedingt ist. Die ausgestatteten Teilstrecken haben insgesamt eine Länge von etwa **12.926 Kilometern**, bezogen auf die Länge des gesamten Netzes entspricht dies einem **Streckenausstattungsgrad von ca. 94,3 %**. Es kann also von einer annähernden Vollaussattung ausgegangen werden, wenn das gesamte CO<sub>2</sub>-Emissionsminderungspotential erschlossen werden soll. Eine regionale Konzentration von Ladestationen ist demzufolge auch nicht festzustellen. Die räumliche Lage der Ladestationen auf den Teilstrecken des Verkehrsnetzmodells unter Berücksichtigung des jeweiligen Stationstyp gibt Abbildung 6-14 wieder.

Die ausgestatteten Teilstrecken sind mehrheitlich in der **Hochleistungskonfiguration** ausgelegt, was das hohe Verkehrsaufkommen entlang der Transitkorridore widerspiegelt. Insbesondere auf stark nachgefragten Zulaufstrecken zu diesen Korridoren wird eine Teilstreckenausstattung in **Leistungskonfiguration** notwendig. Die **Basiskonfiguration** ist auf den übrigen Netzabschnitten mit vergleichsweise niedriger Befahrungstärke vorzufinden.

---



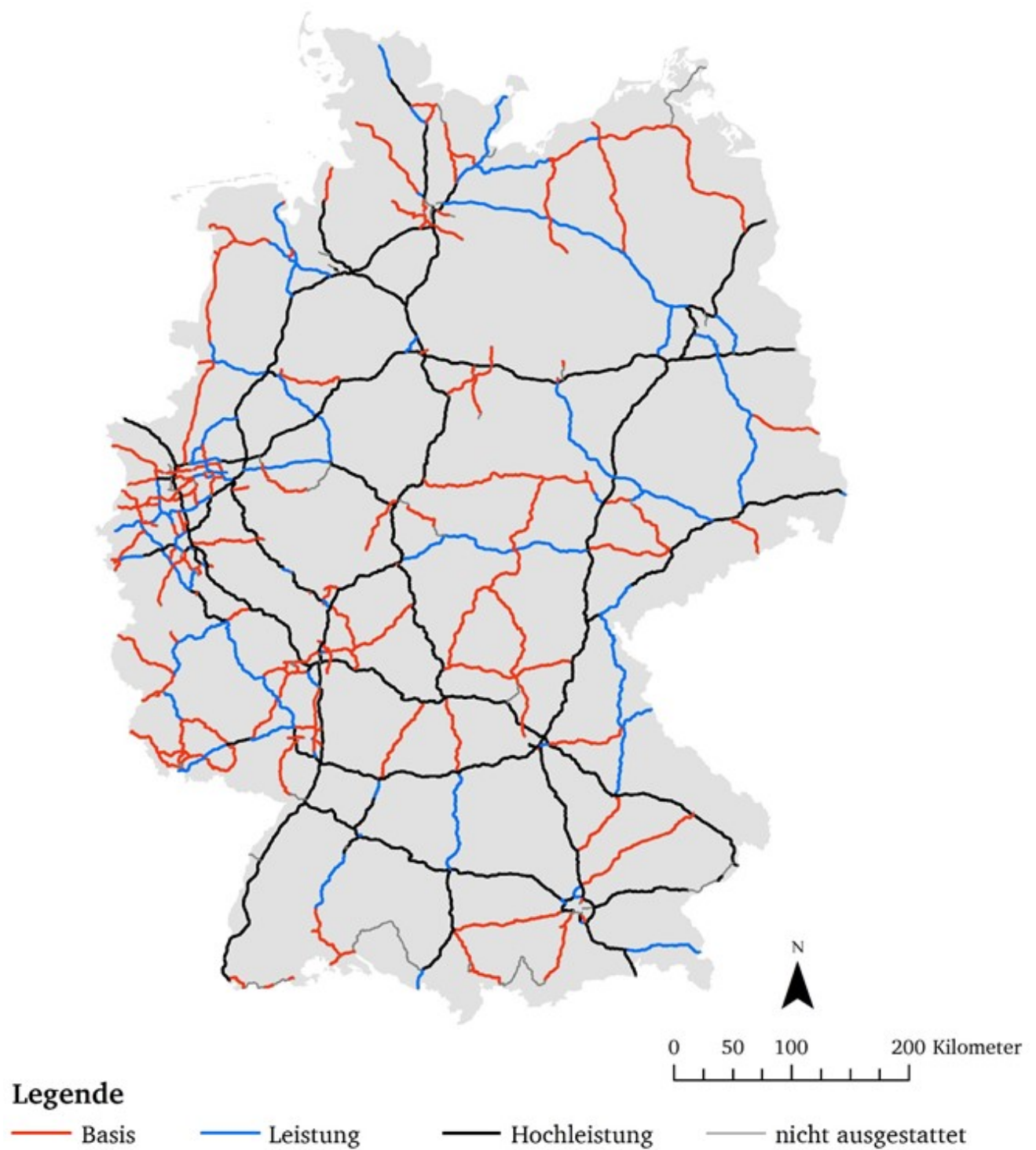


Abbildung 6-14: Ausgestattete Teilstrecken nach Stationstyp, Referenzfahrzeug OH-Lkw 5  
(Quelle: eigene Darstellung).



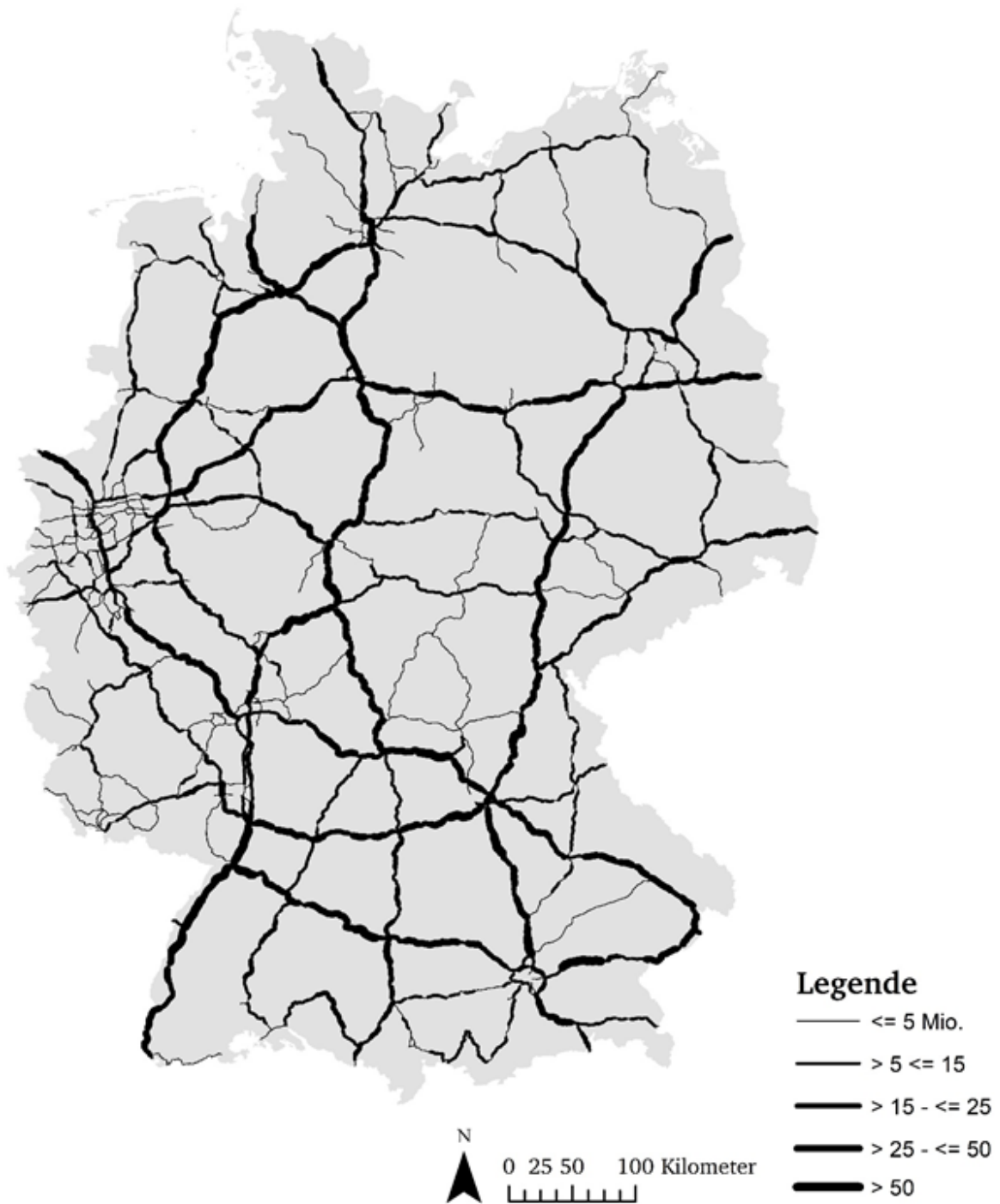


Abbildung 6-15: Elektrische Fahrleistung in Mio. Fzkm pro Jahr, 2030, Referenzfahrzeug OH-Lkw 5  
(Quelle: eigene Darstellung).

Für die resultierende **Netzkonfiguration** müssten insgesamt etwa **31,3 Mrd. EUR** an Investitionskosten aufgewendet werden, wie sich auch Tabelle 6-8 entnehmen lässt. Hier ist die Teilstreckenausstattung nach Stationstyp und Länge mitsamt den resultierenden Investitionskosten abgetragen.

Tabelle 6-8: Kosten und Längen einer Teilstreckenausstattung nach Stationstyp, OH-Lkw 5  
(Quelle: eigene Darstellung).

Stationstyp	Netzlänge (km)	Kosten (Mio. EUR)
Basis	4.859,9	8.261,90
Leistung	2.924,4	7.603,52
Hochleistung	5.141,9	15.425,60
Gesamt	12.926,2	31.291,02

Mit der Fahrleistung für den OH-Lkw 5 die Freisetzung von **CO<sub>2</sub>-Emissionen** verbunden. Bei einer **Well-To-Wheel-Betrachtung** ergeben sich **vermiedene CO<sub>2</sub>-Emissionen** von **5,444 Mio. t** für 2030 (WtW) oder etwa 32,38 % des gesamten identifizierten Potentials von ca. 16,82 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>.

### 6.3.3. Ergebnisse Szenario OH-Lkw 175

Das **Szenario OH-Lkw 175** ist hinsichtlich des unterstellten Musterfahrzeuges von der Annahme gekennzeichnet, dass der Energiespeicher im Fahrzeug mit **175 kWh** entsprechend der prognostizierten Entwicklung über in Zukunft realistische Leistungsgewichte und Kapazitäten von Energiespeichern dimensioniert ist (siehe auch Hacker *et al.* 2020). Daneben verfügt das Fahrzeug über ein Diesellaggregat zur Umwandlung von Dieselmotorkraftstoff in elektrische Energie als Rückfallebene. Somit können auch größere Lücken im Überleitungsnetz überbrückt werden und bei entsprechendem Ladezustand bei Verlassen des übergeordneten Netzes auch der Vor- und Nachlauf im Batteriemodus abgewickelt werden.

Die deutliche Steigerung der mitgeführten Energiemenge gegenüber dem OH-Lkw 5 sollte sich senkend auf den Streckenausstattungsgrad auswirken. Das verwendete Parameterset für das Szenario OH-Lkw 175 ist in Tabelle 6-9 dokumentiert worden.

Tabelle 6-9: Modellparameter für das Szenario OH-Lkw 175  
(Quelle: eigene Darstellung).

Infrastrukturkonfiguration				
Parameter	Einheit	Basis	Leistung	Hochleistung
Dauerleistung je Fahrtrichtung	kW/km	500	1.000	2.000
Nenn-Systemspannung	V <sub>DC</sub>	750	750	1.500
Fahrzeuganzahl	Stk. /km	2	4	8
Traktionsleistung	kW/Fz.	130	130	130
Ladeleistung	kW/Fz.	120	120	120
Investitionskosten (2 Richtungen)	Mio. EUR/km	1,7	2,6	3
Fahrzeugkonfiguration				
Parameter	Einheit	Wert		
Verbrauch Dieselmotormodus	l/km	0,243		
Verbrauch Überleitungsmodus	kWh/km	1,2		
Verbrauch Batteriemodus	kWh/km	1,1		
Emission CO <sub>2</sub> Dieselmotormodus	g CO <sub>2eq</sub> /km (WtW)	820		
Emission CO <sub>2</sub> Strommodi	g CO <sub>2eq</sub> /km (WtW)	494		
Energiespeicherkapazität	kWh (netto)	175		
Ausbaubudget	Mio. EUR	25.000		

## Ergebnisse

Auch im Szenario mit dem OH-Lkw 175 werden **99,93 % der gesamten jährlichen Fahrleistung** für 2030 in den beiden elektrischen Betriebsmodi erbracht, was ja in der Zielfunktion implizit berücksichtigt ist. Pro Modelltag entspricht dies im Durchschnitt etwa **93,01 Mio. Fzkm** bzw. **23.252 Mrd. Fzkm** für das gesamte Modelljahr. Der **Streckenausstattungsgrad** beträgt **ca. 59,01 %** und liegt damit erwartungsgemäß unterhalb dem aus dem Szenario OH-Lkw 5. Die räumliche Lage dieser Ladestationen auf dem Verkehrsnetzmodell unter Berücksichtigung des jeweiligen Stationstyp gibt Abbildung 6-16 wieder.

Das unterstellte Lückenkonzept erlaubt die **Aussparung von etwa 5.620 Kilometern** an Streckenlänge, was einem Anteil von 41,99% der gesamten Netzlänge entspricht. Damit sind **ca. 8.100 Kilometer** mit Systemkomponenten des *eHighway*-Systems auszustatten. Insgesamt wären zu Errichtung dieser Netzkonfiguration **ca. 20,83 Mrd. EUR** aufzuwenden. Die Kosten und Längen der auszustattenden Teilstrecken nach Stationskonfigurationstyp für den OH-Lkw 175 sind in Tabelle 6-10 dokumentiert.

Bei einer **Tank-To-Wheel-Betrachtung** werden von den 16,815 Mio. t CO<sub>2</sub> (TtW) etwa 16,812 Mio. t eingespart. Bei einer **Well-To-Wheel-Betrachtung** ergeben sich **vermiedene CO<sub>2</sub>-Emissionen** von **5,328 Mio. t** für 2030 (WtW). Dies entspricht einer prozentualen Ausschöpfung des identifizierten Potentials von etwa 31,68 %.

Tabelle 6-10: Kosten und Längen einer Teilstreckenausstattung nach Stationstyp, OH-Lkw 175  
(Quelle: eigene Darstellung).

Stationstyp	Netzlänge (km)	Kosten (Mio. EUR)
Basis	2.078,8	3.533,96
Leistung	1.858,8	4.832,89
Hochleistung	4.153,6	12.460,92
Gesamt	8.091,2	20.827,76

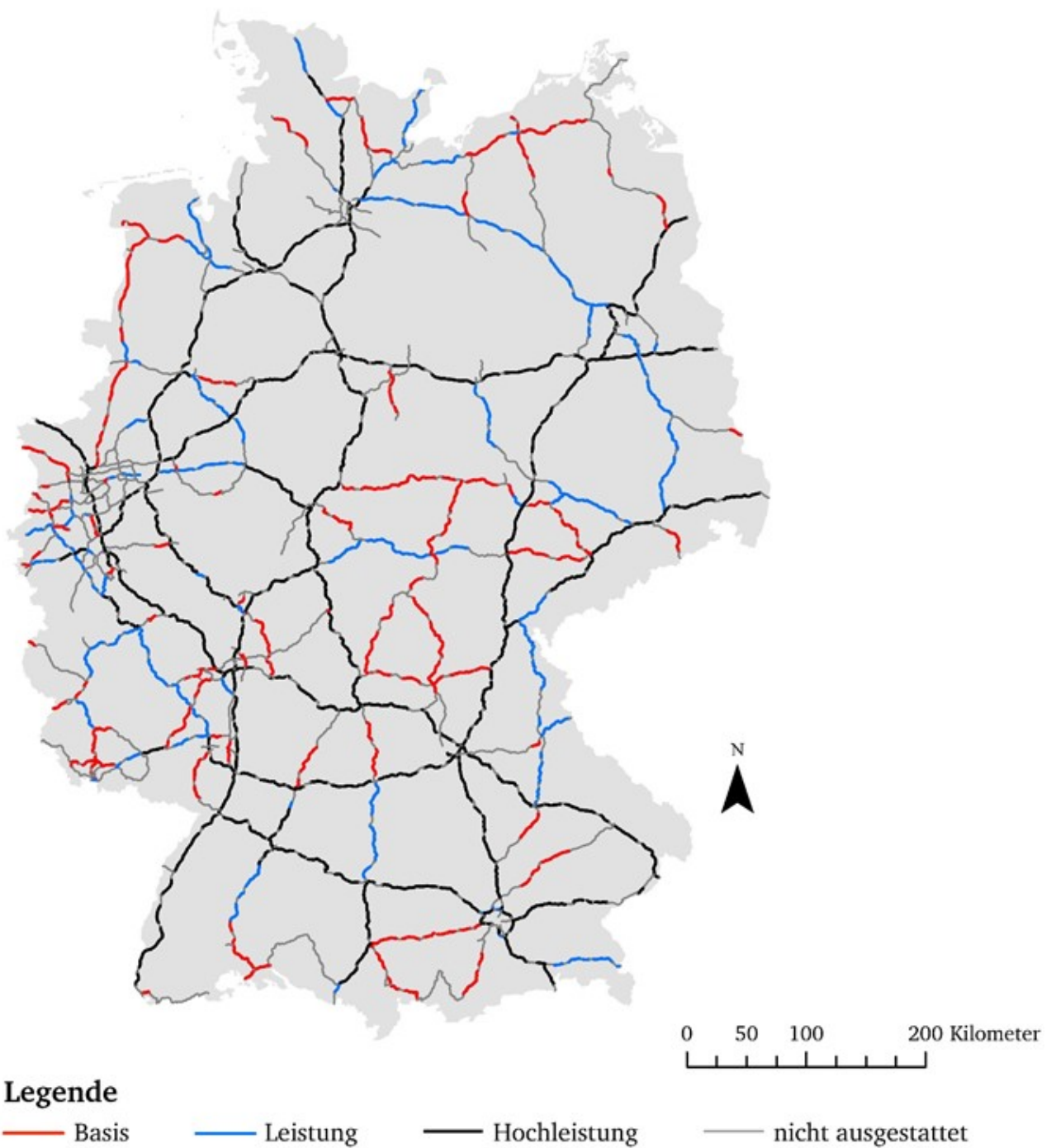


Abbildung 6-16: Ausgestattete Teilstrecken nach Stationstyp, Referenzfahrzeug OH-Lkw 175  
(Quelle: eigene Darstellung).

### 6.3.4. Ergebnisse Szenario OH-Lkw 300

Das **Szenario OH-Lkw 300** unterstellt ein Musterfahrzeug mit einem verbauten Energiespeicher mit einer **Kapazität von 300 kWh** netto. Daneben verfügt das Fahrzeug über ein Dieselaggregat zur Umwandlung von Dieseldraftstoff in elektrische Energie als Rückfallebene. Dank des relativ großen Energiespeichers können einerseits größere Lücken zwischen den Ladestationen überbrückt werden. Andererseits erfordert die Ladung eines vergleichsweise großen Energiespeichers bei gleicher Ladeleistung auch längere Ladezeiten und damit längere Ladestationen. Alternativ kann die Ladeleistung erhöht werden, inwieweit dies jedoch über die Hochleistungskonfiguration hinaus möglich ist, ist unklar. Daher soll diese Option hier nicht betrachtet werden.

In Bezug auf die Oberleitungsinfrastruktur kann wegen des großen Energiespeichers im Modellfahrzeug bereits *ex ante* davon ausgegangen werden, dass hier ein vergleichsweise geringer **Streckenausstattungsgrad** mit Oberleitungen vorzufinden sein wird. Die festgelegten Modellparameter für das Szenario OH-Lkw 300 sind in Tabelle 6-11 festgehalten.

Tabelle 6-11: Modellparameter für das Szenario OH-Lkw 300  
(Quelle: eigene Darstellung).

Infrastrukturkonfiguration				
Parameter	Einheit	Basis	Leistung	Hochleistung
Dauerleistung je Fahrtrichtung	kW/km	500	1.000	2.000
Nenn-Systemspannung	V <sub>DC</sub>	750	750	1.500
Fahrzeuganzahl	Stk. /km	2	4	8
Traktionsleistung	kW/Fz.	130	130	130
Ladeleistung	kW/Fz.	120	120	120
Investitionskosten (2 Richtungen)	Mio. EUR/km	1,7	2,6	3
Fahrzeugkonfiguration				
Parameter	Einheit	Wert		
Verbrauch Dieselmodus	l/km	0,243		
Verbrauch Oberleitungsmodus	kWh/km	1,2		
Verbrauch Batteriemodus	kWh/km	1,1		
Emission CO <sub>2</sub> Dieselmodus	g CO <sub>2eq</sub> /km (WtW)	820		
Emission CO <sub>2</sub> Strommodi	g CO <sub>2eq</sub> /km (WtW)	494		
Energiespeicherkapazität	kWh (netto)	300		
Ausbaubudget	Mio. EUR	25.000		

## Ergebnisse

Im Falle des OH-Lkw 300 werden **nahezu 100% der Fahrleistung** in den elektrischen Fahrzeugbetriebsmodi erbracht. Dies entspricht also etwa **23,253 Mrd. Fzkm** für das Jahr 2030 oder **93,02 Mio. Fzkm** pro Modelltag. Die dafür notwendige **Stationslänge** beträgt ca. **6.990 Kilometer**. Bezogen auf die Länge des unterstellten Netzes entspricht das einem **Streckenausstattungsgrad von ca. 50,95 %**. Die **räumliche Lage dieser Ladestationen** auf dem Verkehrsnetzmodell unter Berücksichtigung des jeweiligen Stationstyp gibt Abbildung 6-17 wieder.

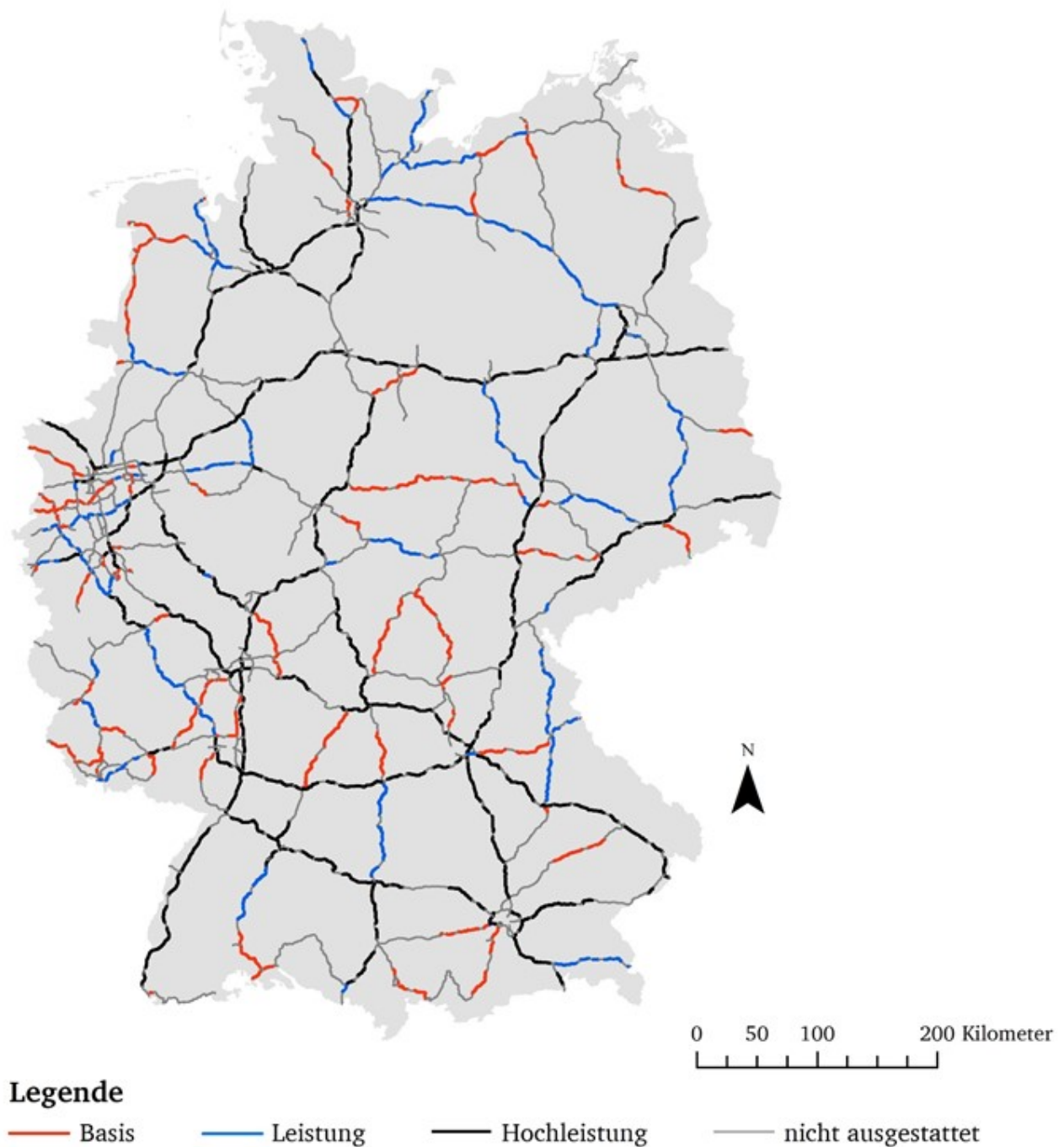


Abbildung 6-17: Ausgestattete Teilstrecken nach Stationstyp, Referenzfahrzeug OH-Lkw 300  
(Quelle: eigene Darstellung).



Bei Betrachtung von Abbildung 6-18 fällt auf, dass der **weit überwiegende Teil** der ausgestatteten Teilstrecken ist in der **Hochleistungskonfiguration** ausgelegt. Eine räumliche Konzentration dieser Art von Ladestationen ist hier auf den Transitachsen in Nord-Süd und auch in Ost-West-Richtung festzustellen, die Stationen verteilen sich hier entlang des gesamten Teilnetzausschnitts.

Einige Teilstrecken sind in **Basis- oder Leistungskonfiguration** ausgestattet, was dem dortigen, geringeren Verkehrsaufkommen geschuldet ist. Diese Stationen befinden sich zumeist auf Zubringer-Netzabschnitten zu den Transitkorridoren, beispielsweise auch auf der Achse Puttgarden-Lübeck-Hamburg der Autobahn A1. Zudem ist der Teilnetzausschnitt zwischen Hamburg und Berlin mit den Autobahnen BAB A24 und A10 in Leistungskonfiguration angelegt.

Das unterstellte Lückenkonzept erlaubt die **Aussparung von etwa 6.725 Kilometern** an Streckenlänge, was einem Anteil von 49,05% der gesamten Netzlänge entspricht. Damit sind ca. **6.987 Kilometer** mit Systemkomponenten des *eHighway*-Systems auszustatten. Insgesamt wären zu Errichtung dieser Netzkonfiguration ca. **17,96 Mrd. EUR** aufzuwenden. Die Kosten und Längen der auszustattenden Teilstrecken nach Stationskonfigurationstyp für den OH-Lkw 300 sind in Tabelle 6-12 dokumentiert.

Tabelle 6-12: Kosten und Längen einer Teilstreckenausstattung nach Stationstyp, OH-Lkw 300  
(Quelle: eigene Darstellung).

Stationstyp	Netzlänge (km)	Kosten (Mio. EUR)
<b>Basis</b>	1.788,6	3.040,64
<b>Leistung</b>	1.691,5	4.397,86
<b>Hochleistung</b>	3.506,7	10.520,24
<b>Gesamt</b>	6.986,8	17.958,75

Bezogen auf die **elektrische Fahrleistung** auf den ausgestatteten und nicht ausgestatteten Teilstrecken ergibt sich ein ähnliches räumliches Bild wie für den Diesel-Referenzfall, da ja fast ausschließlich in den beiden elektrischen Betriebsmodi gefahren wird. Die **Verteilung der jährlichen Fahrleistung** in Mio. Fzkm für 2030 auf die Teilstrecken des Verkehrsnetzmodells ist in Abbildung 6-19 dargestellt, sowie in Anhang 5 für jede Teilstrecke dokumentiert.

Mit der Erbringung der Fahrleistung ist auch für den OH-Lkw 300 die Freisetzung von **CO<sub>2</sub>-Emissionen** verbunden. Bei einer **Well-To-Wheel-Betrachtung** ergeben sich **vermiedene CO<sub>2</sub>-Emissionen** von **5,328 Mio. t** für 2030 (WtW). Dies entspricht einer prozentualen Ausschöpfung des identifizierten Potentials von etwa 31,68 %. Bei einer **Tank-To-Wheel-Betrachtung** fällt die Ausschöpfungsquote noch höher aus: in diesem Fall werden von den 16,815 Mio. t CO<sub>2</sub> (TtW) etwa 16,812 Mio. t eingespart, da per Definition im TtW-Fall während der Fahrt keine direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen anfallen.

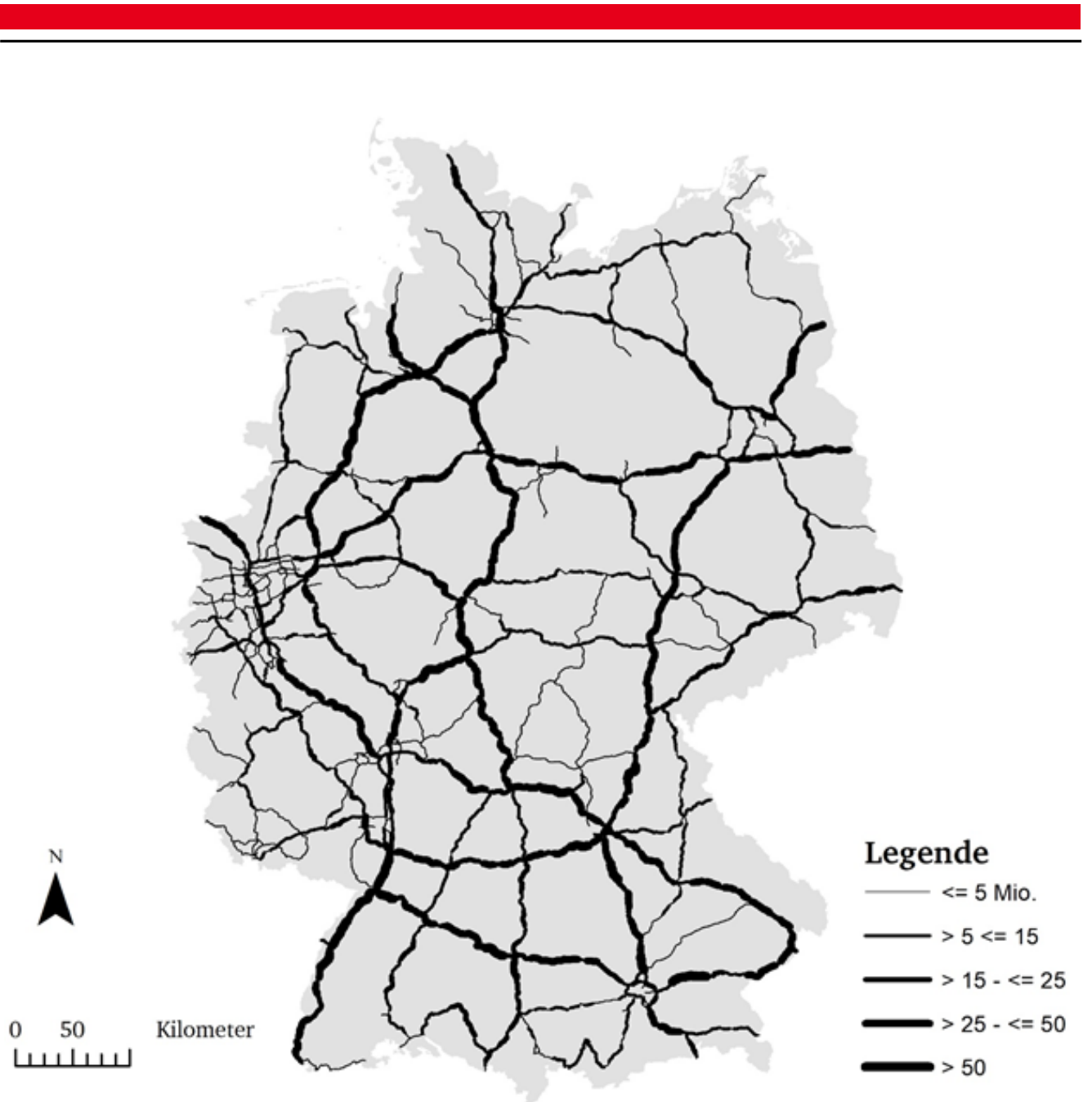


Abbildung 6-18: Elektrische Fahrleistung in Mio. Fzkm, 2030, Referenzfahrzeug OH-Lkw 300  
(Quelle: eigene Darstellung).

### 6.3.5. Empfehlungen für Netzausbaukorridore

Werden die in den **drei Szenarien** erzeugten **Netzkonfigurationen** auf Ebene der **ausgestatteten Teilstrecken** verglichen, kann auf dieser Basis eine **Empfehlung von Korridoren** gegeben werden, die sich besonders für einen initialen **Netzausbau** eignen. Hierzu wurden alle Teilstrecken hinsichtlich ihrer Ausstattung und ihrer elektrischen Fahrleistung in den drei Szenarien verglichen. Auf dieser Basis wurden **möglichst durchgängige Netzausbaukorridore** identifiziert. Die dadurch entstehende Netzkonfiguration für ein **initiales Ausbaunetz** ist in Abbildung 6-19 dargestellt.

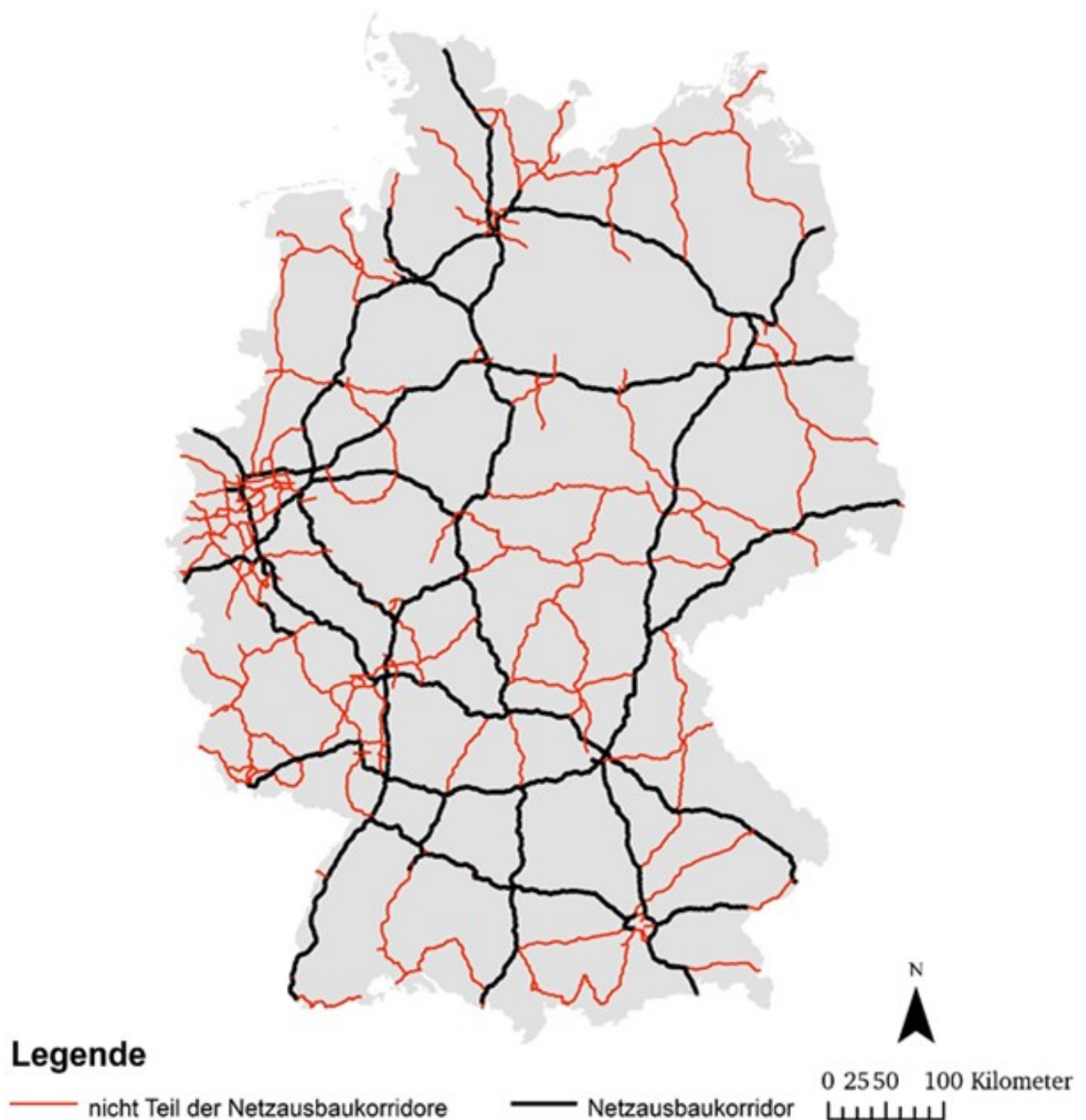


Abbildung 6-19: Ausbaukorridore auf Basis der Modellanwendung von OAASEE  
(Quelle: eigene Darstellung).

Die abgeleiteten **Netzausbaukorridore** zeichnen sich durch eine besonders **hohe Verkehrsnachfrage** aus, da sie einerseits weite Teile klassischer **Transitautobahnen** wie den Bundesautobahnen A1, A2, A5, A3, A7, A9, A10 oder A11 umfassen. Andererseits verbinden die Korridore die **logistischen und wirtschaftlichen Zentren** Deutschlands und erhalten hierdurch eine Erschließungsfunktion. Solche Korridorteile sind zum Beispiel die Abschnitte der Bundesautobahnen A6, A8 oder A81. Auch einzelne, regional bedeutsame Teilstrecken oder „Exklaven“ des Hauptnetzes sind enthalten, wie z.B. Teile der Bundesautobahnen A4, A6, A40, A30, A44 oder A73.

Würden die definierten **Netzausbaukorridore** in ihrer **Gesamtheit** mit *eHighway*-Systemkomponenten ausgestattet werden, fielen hierfür ca. **17,346 Mrd. EUR** an. Das **Gesamtnetz**, das durch eine Zusammenfassung der Netzausbaukorridore entsteht, hat eine **Länge von ca. 5.900 Kilometer**. Innerhalb der definierten Korridore können, wenn ein **Ausbau nach dem Lückenkonzept** vorgenommen werden soll, bestimmte **Teilstrecken ausgespart** werden. Welche Teilstrecken dies betrifft, hängt **maßgeblich** von der in den Fahrzeugen **mitgeführten Energiemenge** ab, da diese Energie für die Traktion umgesetzt werden kann und damit die entstehenden Lücken überbrückt werden können. Aus diesem Grund wurde auf Basis der definierten Korridore eine Parametervariation im Rahmen der Anwendung von OAASEE durchgeführt. Hierbei dürfen nur Teilstrecken mit *eHighway*-Systemkomponenten ausgestattet werden, die Teil der definierten Netzausbaukorridore sind. Dabei gingen die in Tabelle 6-14 in der linken Spalte abgetragenen Energiespeicherkapazität als Eingangsgrößen ein, die übrige Konfiguration des Referenzfahrzeuges blieb fixiert. Als Budgetgrenze wurden 12,2 Mrd. EUR definiert. Im Ergebnis wurde dann je **Modellanwendung** zunächst eine **Netzkonfiguration** auf Basis des beschriebenen Vorgehens bei den drei Szenarien abgeleitet, d.h. auch eine **Netzlänge**, ein **Streckenausstattungsgrad** sowie die begleitenden **Ausbaukosten** und sowie die **CO<sub>2</sub>-Emissionseinsparungen** ermittelt. Tabelle 6-13 zeigt die Ergebnisse der Modellanwendung von OAASEE.

Tabelle 6-13: Ergebnisse einer Parametervariation der Energiespeicherkapazität für die Netzkonfiguration Hochleistung  
(Quelle: eigene Berechnung).

Energiespeicher- kapazität	Netz- länge	Streckenaus- stattungsgrad	CO <sub>2</sub> -Emissionseinsparung	
			Mio. t/Jahr (WtW)	Mio. t/Jahr (TtW)
kWh (netto)	km	%		
75	4.102,0	29,9	4,448	14,038
125	4.122,2	30,1	4,819	15,208
175	4.122,2	30,0	5,042	15,912
225	4.110,7	30,1	5,183	16,357
275	4.131,4	30,1	5,254	16,580
325	4.124,7	30,1	5,293	16,703
375	4.125,9	30,2	5,310	16,756
425	4.141,9	30,2	5,314	16,770

---

Bei Betrachtung der Ergebnisse in Tabelle 6-13 fällt einerseits der relativ **konstante Streckenausstattungsgrad** ins Auge. Dieses Phänomen lässt sich anhand der Zielfunktion, die der Optimierungskomponente von OAASEE zugrunde liegt, erklären. Das zur Verfügung stehende Budget wird ausgenutzt, um einen möglichst hohen Anteil der gesamten Fahrleistung in den elektrischen Betriebsmodi abzuwickeln und dadurch die CO<sub>2</sub>-Emissionseinsparungen zu maximieren. Die Schwankungsbreite der Netzlänge liegt auch lediglich im Bereich einer Teilstrecke. Das erwartungstreue Verhalten von OAASEE lässt sich hier also gut beobachten.

Andererseits verhält sich das Modell hier aus einem weiteren Grund wie erwartet: die **Emissionseinsparungen steigen** mit einer **Zunahme der Kapazität des Energiespeichers**. Dies liegt daran, dass auf der einen Seite durch das verhältnismäßig engmaschige Netz an elektrifizierten Teilstrecken ein Großteil der Fahrleistung „unter Draht“ erbracht werden kann. Auf der anderen Seite kann bei Verlassen der Netzausbaukorridore ein relativ hoher Anteil der Fahrleistung im Batteriemodus erfolgen. Hierdurch steigen die elektrische Fahrleistung und damit auch die **Emissionseinsparungen**. OAASEE verhält sich hier also erwartungstreu.

Aus der Analyse von Tabelle 6-13 geht außerdem hervor, dass **hohe Kapazitäten** der in den Fahrzeugen mitgeführten **Energiespeicher** und ein flächendeckendes Netz an Ladestationen sich positiv auf die **Ausschöpfungsquote** des CO<sub>2</sub>-Emissionseinsparungspotentials auswirken. In diesem Zusammenhang kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass neben der Ausstattung des Straßenverkehrsnetzes auch der flankierenden Förderung der **Weiterentwicklung der Energiespeicher** für die Fahrzeuge sowie, damit verbunden, der weiteren **Optimierung** der OH-Lkw eine hohe Bedeutung zukommt. Insbesondere eine **Gewichtsreduktion** der fahrzeugseitigen *eHighway*-Komponenten wie Pantograph und Wechselrichtereinheit wirken sich einerseits positiv auf die realisierbare Reichweite der Fahrzeuge aus. Andererseits sinken damit auch die Beschaffungskosten. Einige weitere förderpolitische Instrumente wurden auch in (Hacker *et al.* 2020) analysiert und daraus Handlungsempfehlungen abgeleitet. Diese Maßnahmen steigern die **Attraktivität** des *eHighway* bzw. der OH-Lkw im Allgemeinen.

### 6.3.6. Einordnung der Modellergebnisse

Zur **Einordnung der Ergebnisse** aus der Anwendung von OAASEE eignen sich prinzipiell die bereits erwähnten Veröffentlichungen der beiden **Projekte Roadmap OH-Lkw und StratOn** (Hacker *et al.* 2020; Jöhrens *et al.* 2018; Jöhrens *et al.* 2020). Einen **Überblick** ausgewählter, **vergleichsrelevanter Kenngrößen** dieser Studien sowie der **Ergebniskorridor** aus der **Modellanwendung von OAASEE** gibt Tabelle 6-14.

Tabelle 6-14: Gegenüberstellung der Modellergebnisse und weiterer Studien

(Quellen: Spalte StratOn: Hacker *et al.* 2020, Spalte Roadmap OH-Lkw: Jöhrens *et al.* 2020, OAASEE: eigene Berechnungen).

Kenngröße (Jahr 2030)	Einheit	StratON	Roadmap OH-Lkw	OAASEE*
Fahrleistungspotential	Mrd. Fzkm/Jahr	variabel	41,0	23,25
CO <sub>2</sub> -Minderungspotential	Mio. t/Jahr (TtW)	variabel	32,7	16,81
CO <sub>2</sub> -Emissionseinsparung	Mio. t/Jahr (TtW)	3,0 - 6,0	3,6	14,04 - 16,77
Ausschöpfungsquote des CO <sub>2</sub> -Minderungspotentials	%	variabel	ca. 11,0	83,5 – 99,7
Energiespeicherkapazität	kWh (netto)	175 - 350	150 - 250	75 - 425
Ausbaubudget	Mrd. EUR	variabel	5,5 - 15,6	12,1 - 12,2
Ausgestattete Netzlänge	Km	3.800	3.235	ca. 4120 - 4150
Prognosejahr	-	2025 - 2050	2030	2030
Relationen	-	-	ca. 85.000**	64.760***

\* Berechnungen auf Basis der Korridorempfehlungen

\*\* zonale Aggregation: NUTS 3

\*\*\* zonale Aggregation: LAU 1

Da im **Projekt StratOn** Ausbaupfade mit verschiedenen Basisjahren abgeleitet worden sind und nicht immer alle Ergebnisse für jedes Modelljahr zugänglich waren, sind die Ergebnisse dieser Studie hier der Vollständigkeit halber aufgeführt, eignen sich aber nur **eingeschränkt für einen Vergleich** mit den Modellergebnisse von OAASEE. Zudem bauen sie auf die Ergebnisse des Projekt Roadmap OH-Lkw für das Jahr 2030 auf.

Im **Projekt Roadmap OH-Lkw** wurde auf Basis einer **41,0 Mrd. Fzkm** enthaltenden Stichprobe ein Minderungspotential von ca. **9,2 Mio. t/Jahr (TtW)** identifiziert, wovon ca. **3,6 Mio. t/Jahr** eingespart werden könnten. Voraussetzung dafür wäre der Ausbau von **ca. 3.235 Kilometern**, wofür ein Finanzierungsbedarf **zwischen 5,5 und 15,6 Mrd. EUR** entstehen würde. Allerdings wurde hierbei ein Vollausbau und kein Lückenkonzept unterstellt. Die Fahrzeuge verfügen trotzdem über größere Energiespeicher von 150 bis 250 kWh Kapazität.



---

Auf Basis der oben definierten Korridore sowie der **Anwendung von OAASEE** könnten von den 16,81 Mio. Tonnen pro Jahr, die im Rahmen dieser Arbeit als **Einsparpotential** ermittelt worden sind, insgesamt zwischen **26,5% und 31,6 % oder 4,45 bzw. 5,31 Mio. t (WtW)** an CO<sub>2</sub>-Emissionen vermieden werden. Bei einer Betrachtung der **Tank-To-Wheel-Emissionen** von Kohlenstoffdioxid erhöht sich die Ausschöpfungsquote auf ein Intervall zwischen **83,5 bis 99,7%**. In diesem Fall können dann zwischen **14,04 und 16,77 Mio. t (TtW)** pro Jahr eingespart werden. Dafür wäre in Abhängigkeit der in den Fahrzeugen maximal mitgeführten Energiemenge eine **Netzlänge** zwischen **ca. 4.100 und 4.140 Kilometern** mit Oberleitungen auszustatten. Das **Ausbaubudget** müsste dann bei ca. **12,2 Mrd. EUR** liegen.

Eine **Reihe von Gründen** lässt sich zur **Erklärung der abweichenden Modellergebnisse** der drei Arbeiten bezüglich der Fahrleistung und damit einhergehend auch den begleitenden CO<sub>2</sub>-Emissionen heranziehen. Eine Einordnung der Modellergebnisse von OAASEE und der Vergleich mit anderen Studien sollte vor dem Hintergrund dieser einschränkenden Ausführungen erfolgen.

Zum Ersten verwenden die drei Arbeiten aus verschiedenen Gründen **unterschiedlich aggregierte oder abgeleitete Verkehrsnachfragedaten** als Eingangsgrößen. So geht das Projekt Roadmap OH-Lkw beispielsweise davon aus, dass nur Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht von mehr als 26 Tonnen sich für den *eHighway* eignen. Weil fahrzeugtypenspezifische Auslastungsgrade bei der Umrechnung von Mengen- in Fahrzeugströmen hier nicht verfügbar waren, kann OAASEE bereits zu einer abweichenden Schätzung des Fahrtenaufkommens einer bestimmten Relation gelangen.

Zum Zweiten können **verschiedene Auflösungsgrade der verwendeten Verkehrsnetzmodelle** zu Abweichungen bei der Berechnung der jeweiligen Fahrleistung führen, selbst wenn dasselbe Fahrtenaufkommen auf denselben Relationen unterstellt würde. Zudem wurden abweichende Zonierungen und somit auch ggf. abweichende Netzeinspeiseknoten verwendet, was sich auf die ausgewiesene Fahrleistung steigernd oder senkend auswirken kann.

Zum Dritten wurde im Rahmen von OAASEE mit einem **Bestweg-Umlegungsverfahren** gearbeitet, im BVWP bzw. dem Projekt Roadmap OH-Lkw hingegen mit einer belastungsabhängigen Verkehrsumlegung. Somit entstehen auch unterschiedliche Kantenbelastungen, die abweichende Fahrleistungen bedeuten können.

Auf Grund dieser Ausführungen erklären sich dann auch unterschiedliche **Einschätzungen zu Netzausbau-Stufen, Emissionsminderungspotentialen** oder **elektrischen Fahrleistungen** der in den folgenden Abschnitten vorgestellten Szenarien. Die Ergebnisse dieser Arbeit und die zitierten Studien widersprechen sich jedoch nicht, sondern ergänzen sich aus inhaltlicher wie methodischer Sicht.



---

## 7. Schlussbetrachtung

---

Zum Abschluss der Untersuchung werden in diesem Kapitel zunächst die wichtigsten **Erkenntnisse** in Bezug auf die in Abschnitt 1.2 formulierten **Forschungsziele** dargestellt. Darauf aufbauend werden im Wege eines **Ausblicks** einerseits einige **Anregungen für weitere Forschungsarbeit** auf dem Themengebiet und gegeben. Zudem wird auf **Verbesserungsmöglichkeiten des Modells OAASEE** und **alternative Modellierungsansätze** hingewiesen. Daneben werden im Rahmen dieses Ausblicks einige **politische Handlungsempfehlungen** hinsichtlich des Einsatzes von Systemen zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt in Deutschland gegeben, um mögliche zukünftige Entwicklungspfade aufzuzeigen.

### 7.1. Zusammenfassung

Das **oberste Ziel** dieser Arbeit war es, ein **Verfahren zur simulationsbasierten Optimierung** der Ausstattung deutscher Autobahnen mit Systemen zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt zu entwickeln. Die Entwicklung eines solchen Verfahrens war einerseits notwendig, da bisher noch kein **Verfahren zur genauen räumlichen Verortung** von Ladestationen im Raum existierte. Andererseits kann ein solches Verfahren auch die notwendige **Datengrundlage** für eine **vergleichende Bewertung verschiedener Systeme** zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt hinsichtlich ihres Beitrags zu **politischen Zielen** und hinsichtlich ihres **volkswirtschaftlichen Nutzens** liefern.

Zur Erreichung dieses Ziels wurden im Verlauf der Arbeit zunächst einige **theoretische und methodische Grundlagen** eingeführt. Außerdem wurden **verschiedene Systeme zur Energieversorgung** des Elektroverkehrs während der Fahrt **beschrieben, klassifiziert** und hinsichtlich ihres Technologiereifegrads **vergleichend bewertet**. Auf dieser Basis wurde dann mit dem **eHighway in Deutschland** ein **reales Beispiel** für das zu entwickelnde simulationsbasierte Optimierungsverfahren ausgewählt, um das Verfahren einer **Anwendung** zuführen zu können. Aufbauend auf dieser umfangreichen methodisch-theoretischen Grundlage wurde dann ein **simulationsbasiertes Optimierungsverfahren** auf konzeptioneller Ebene entworfen. Hierbei wurde formal auf das Instrumentarium der **ereignisgesteuerten Prozessketten** zurückgegriffen um, wo immer möglich, den algorithmischen **Ablauf des Verfahrens** unabhängig von einer konkreten Implementierung beschreiben zu können. Zudem wurden ergänzende Anregungen für eine konkrete Umsetzung gegeben.

Das vorgeschlagene Verfahren besteht aus **den drei eigenständigen Verfahrensteilen** *Infrastrukturbewertung*, *Güterverkehrsnachfrage*, und *Lageermittlung*. Der **Verfahrensteil Güterverkehrsnachfrage** dient der **Bereitstellung** einer Datengrundlage hinsichtlich der **Güterverkehrsnachfrage** für den Planungsraum und den Untersuchungszeitpunkt. Hierfür eignen sich verschiedene Verfahren in Abhängigkeit der Verfügbarkeit bestimmter Eingangsdaten. Wichtig ist hierbei allein, dass die ermittelte Verkehrsnachfrage auf Knotenebene als Liste vorliegen muss, damit der Verfahrensteil *Lageermittlung* damit arbeiten kann.

Der **Verfahrensteil Infrastrukturbewertung** dient der **Bewertung** von **Streckenelementen** und **Streckenabschnitten** hinsichtlich ihrer **Ausstattungsfähigkeit mit Ladeinfrastruktur-Komponenten** verschiedener Systeme zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt. Zudem ermöglicht der Verfahrensteil die **Ableitung von Ausstattungsvarianten sowie deren Vergleich** aus einer planerisch-bautechnischen Perspektive. Methodisch greift das Verfahren auf eine **Nutzwertanalyse** zurück, die jedem Streckenelement bzw. -abschnitt einen Nutzwert zuordnet um auf dessen Basis die binäre

---

---

Entscheidung treffen zu können, ob das betreffende Streckenelement bzw. der Streckenabschnitt ausstattungsfähig ist oder nicht. Auf Basis der **Ergebnisse** des Verfahrensteils können somit **verlässlichere Kostenschätzungen** vorgenommen werden.

Die **Ergebnisse der Infrastrukturbewertung** auf der einen Seite sowie die Relationsliste aus dem **Verfahrensteil Güterverkehrsnachfrage** auf der anderen Seite dienen als **Eingangsdaten** für den **dritten Verfahrensteil**, die **Lageermittlung** für Ladestationen auf dem Verkehrsnetzmodell. In diesen Verfahrensteil fließen zudem noch weitere Datenquellen ein, der im Rahmen eines gekoppelten, **simulationsbasierten Optimierungsansatzes** eine bedarfsgerechte und bestenfalls auch im mathematischen Sinne **optimale Netzkonfiguration für bestimmtes System zur Energieversorgung während der Fahrt** ermitteln soll. In der **Simulationskomponente** des Verfahrensteils wird je Simulationsexperiment eine **Netzwerkkonfigurationen** des unterstellten Energieversorgungssystems erzeugt. Dabei werden einerseits Ergebnisse der Infrastrukturbewertung berücksichtigt und andererseits die Relationen der Relationsliste verwendet. Diese **Netzkonfiguration** wird an die **Optimierungskomponente** weitergegeben, die einerseits den Verfahrensablauf steuert und andererseits die Netzkonfiguration **bewertet**. Hierzu wurde eine **Ziel- bzw. Bewertungsfunktion** vorgeschlagen, die auf eine **Maximierung der eingesparten CO<sub>2</sub>-Emissionen** unter Beachtung einer **Budgetrestriktion** abstellt. Im Ergebnis können so verschiedene **Kenngrößen** wie die vermiedenen CO<sub>2</sub>-Emissionen, den finanziellen Bedarf sowie die Fahrleistung in den verschiedenen Betriebsmodi ermittelt werden.

Durch die Anwendung des entwickelten Verfahrens auf das *eHighway*-System für den Planungsraum der deutschen Autobahnen liefert diese Arbeit neben einem methodischen Beitrag auch **praxisrelevante Erkenntnisse**. Um dies in einem weiteren Untersuchungsschritt zu ermöglichen, wurde auf Basis des generischen Verfahrens ein **gekoppeltes Simulations- und Optimierungsmodell** mit der Bezeichnung OAASEE entworfen und als eigenständige Software-Applikation implementiert. Das Modell OAASEE besteht konsequenterweise aus den drei gekoppelten und über Schnittstellen verbundenen **Modulen Güterverkehrsnachfrage, Infrastrukturbewertung und Lageermittlung**. Das Modell bietet dem Anwender umfangreiche Möglichkeiten zur **Parametrisierung des Verfahrens** über eine grafische **Benutzeroberfläche** und kann so unabhängig von einem konkreten Anwendungsfall eingesetzt werden (ein Anwendungsfall ist in diesem Kontext eine Kombination aus Energieversorgungssystem, Verkehrsnachfrage und Planungsraum).

Für den **Anwendungsfall eHighway** auf deutschen Autobahnen wurde im Rahmen des **Moduls Güterverkehrsnachfrage** auf Basis der Verflechtungsmatrix des BVWP 2030 eine Disaggregation der Güterströme auf Fahrzeugströme zwischen Netzeinspeiseknoten vorgenommen und das Vorgehen wurde ausführlich dokumentiert. Leider konnte das **Modul Infrastrukturbewertung nicht** auf Grundlage des Praxisbeispiels angewendet werden, weil bei Fertigstellung der Arbeit noch **kein Zugriff auf immanent wichtige Daten** zu Bauwerken, Beschilderungsstandorten, Regelquerschnitten und weiteren ähnlichen Informationen bestand. Diese **Daten liegen** jedoch bei den **Auftragsverwaltungen der Länder** vor und daher könnte der Verfahrensteil, der auch eigenständig eingesetzt werden kann, prinzipiell auch in der Planungspraxis Anwendung finden.

Für das **Modul Lageermittlung** wurde OAASEE mit einer **Stichprobe an Relationen** aus dem Modul Güterverkehrsnachfrage versorgt und das Modul wurde anschließend auf Basis einer Literaturanalyse parametrisiert. Hierzu wurde ein **szenarienbasiertes Vorgehen** gewählt: jedes Szenario ist durch einen

---

Parametersatz bestehend aus Infrastruktur-Konfigurationen, einem Referenzfahrzeug sowie einer Budgetvorgabe beschrieben. Neben einem **Szenario**, das auf den **Dieselmotor** als Antriebstechnologie abstellt und so einen Referenzpunkt zu Vergleichszwecken bietet, wurden insgesamt drei weitere Szenarien untersucht. Im Wesentlichen unterscheiden sich die Szenarien hinsichtlich der Dimensionierung des fahrzeugseitig verbauten **Energiespeichers**. Für jedes der **drei Szenarien** wurde dann durch OAASEE eine **Netzkonfiguration** für den *eHighway* auf deutschen Autobahnen abgeleitet. Auf Basis eines **Vergleichs** der drei resultierenden **Netzkonfigurationen** wurde eine **Ausbauempfehlung für besonders geeignete Korridore** formuliert und diese genutzt, um entsprechende Kenngrößen zu erzeugen. Die Modellergebnisse wurden außerdem in die vorhandene Veröffentlichungslandschaft eingeordnet.

Mit Blick auf die formulierten **Forschungsziele dieser Arbeit** kann damit festgehalten werden, dass diese erfüllt worden sind. Das entwickelte Verfahren bzw. das **Modell OAASEE kann system- und anwendungsfallunabhängig Netzkonfigurationen** unter Einhaltung sowohl **finanzieller** als auch **infrastruktureller Restriktionen** ermitteln. Damit eignet sich das Verfahren z.B. für einen **Einsatz** im Rahmen eines **Verkehrsplanungsprozesses** auf **gesamtdeutscher Ebene**. Im Zuge dieses Prozesses kann dann eine **umfassende Bewertung verschiedener Systeme** aus volkswirtschaftlicher Sicht durchgeführt werden, wofür die ermittelten Netzkonfigurationen eine Ausgangsbasis bieten. Durch die Anwendung des entwickelten Verfahrens auf einen **Anwendungsfall** konnte diese Arbeit neben dem beschriebenen, methodischen Beitrag auch einige **praxisrelevante Erkenntnisse** liefern. Die **Ergebnisse** dieses Anwendungsfalls **ergänzen die Ergebnisse anderer Studien** und leisten damit einen Beitrag zu einem Umstieg des Straßengüterverkehrs auf umweltfreundlichere Antriebs- und Energieversorgungssysteme.

---

---

## 7.2. Ausblick

### 7.2.1. Weiterer Forschungsbedarf

Obwohl im Rahmen dieser Arbeit bereits einige wertvolle **Erkenntnisse** in Bezug auf die **Planung und den Ausbau des deutschen Straßenverkehrssystem** mit Systemen zur Energieversorgung während der Fahrt für gewonnen werden konnten, bestehen auf dem adressierten Forschungsfeld einige **Anknüpfungspunkte für weitere wissenschaftliche Arbeiten**. Daher werden in diesem Abschnitt diverse Impulse für weitere Arbeiten auf diesem sowohl aus verkehrswissenschaftlicher als auch gesellschaftlicher Sicht relevanten Forschungsfeld gegeben.

Dieser weitere Forschungsbedarf lässt sich in zwei Themengebiete einteilen. Zum ersten bestehen unmittelbar weitere **Erweiterungs- und Verbesserungsmöglichkeiten** in Bezug auf die hier **entwickelte wissenschaftliche Methode**. Zum zweiten bedarf es **hinsichtlich** des konkreten **Anwendungsfalls** der Systeme zur Energieversorgung während der Fahrt in Deutschland **weiterer wissenschaftlicher Arbeiten** um eine flächendeckende Ausstattung der Verkehrssysteme vorzubereiten.

#### Methodische Weiterentwicklungen des Verfahrens bzw. der Software-Module

Das hier vorgestellte **Verfahren** zur simulationsbasierten Optimierung der Ausstattung deutscher Autobahnen mit Systemen zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt kann an einigen Stellen **ergänzt, erweitert oder verbessert** werden. Der hier angesprochenen **Weiterentwicklungsbedarf** konnten aus verschiedenen Gründen nicht in diese Arbeit einfließen, die von **Zeitrestriktionen** bis zu **Problemen bei der Datenverfügbarkeit** reichen. Dennoch sollen sie im Wege dieses Ausblicks hier dokumentiert werden.

Offensichtlicher Bedarf für weitere Forschung besteht in Bezug auf die Anwendung des **Verfahrensteil Infrastrukturbewertung**: zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit bestand noch **kein Zugriff** auf eine umfassende **Datengrundlage** in Bezug auf einige wichtige Bewertungskriterien, sodass eine Anwendung des Verfahrens noch aussteht. Prinzipiell stehen diese Daten jedoch an verschiedenen Stellen zur Verfügung und können im Rahmen weiterer Arbeiten in das Verfahren einfließen. Hierdurch können die Ergebnisse des hier vorgestellten Anwendungsfalls sowie weiterer Anwendungsfälle verbessert werden.

Über eine noch zu ergänzende, **datenbankgestützte Funktionalität** zum **Austausch von Streckenelementen** in den **Modulen Lageermittlung** einerseits und **Infrastrukturbewertung** andererseits ließe sich implementierungsseitig im Rahmen konkreter Anwendungsfälle eine umfassende Infrastrukturbewertung in das softwaregestützte, simulationsbasierte Optimierungsverfahren integrieren. Der Quellcode von BeTSIE und OAASEE als Ausgangspunkt hierfür steht in Form von der Anlagen 1 und 2 daher frei zur Verfügung.

Zudem könnte der **Verfahrensteil Infrastrukturbewertung (bzw. auch das Software-Modul BeTSIE)** mit zunehmendem Erkenntnisfortschritt in der Forschung zu den Systemen zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt auch methodisch weiterentwickelt werden, indem z.B. andere Bewertungsmethoden als die Nutzwertanalyse zum Einsatz kommen. Eine Voraussetzung hierfür ist, dass entsprechende, neue und gesicherte Erkenntnisse vorliegen, die eine Monetarisierung bestimmter

---

Kriterien ermöglichen. Zudem könnten bei Verfügbarkeit einer digitalisierten Datengrundlage auch weitere Kriterien in das automatisierte Bewertungsverfahren im Modul BeTSIE integriert werden

Der in Kapitel 6 beschriebene **Anwendungsfall** könnte auch weiter verbessert werden. Ein Ansatzpunkt ist hier die Verbesserung der **Routenwahl** im Rahmen des **Verfahrensteils Güterverkehrsnachfrage**. Derzeit wird jedem Mittelpunkt einer LAU-Einheit diejenige Autobahn-Anschlussstelle als Netzeinspeiseknoten zugeordnet, die in distanzminimaler Entfernung zu ihm liegt. In einem ersten Verbesserungsschritt könnte an diese Stelle eine **k-kürzeste-Wege-Suche** treten. Dies hätte dann den Effekt, dass mehrere Netzeinspeiseknoten je LAU-Einheit gewählt und das Quell-Ziel-Aufkommen zwischen zwei LAU-Einheiten noch einmal auf alle zugehörigen Netzeinspeiseknoten verteilt werden. Dieses Verfahren könnte für ein **Basisjahr** angewendet und die **entstehenden Anteile je Netzeinspeiseknoten** für das **Prognosejahr übernommen** werden. Zur Validierung der Ergebnisse dieses Verfahrens für das Basisjahr eignen sich z.B. die kontinuierlich erhobenen und hochverfügbaren Daten der **BAS** von **Autobahn-Dauerzählstellen**.

Das Verfahren könnte zudem als **eigenständige Anwendung als Expertensystem** unter Nutzung der Module BeTSIE und OAASEE implementiert werden. Das Verfahren könnte so perspektivisch z.B. von den zuständigen Straßenverkehrsbehörden oder anderen Planungsträgern zur **Ableitung und Bewertung von Ausstattungsvarianten** genutzt werden. Hierbei sollte das Entwicklungsziel darin bestehen, insbesondere die Datengrundlage sowie die Laufzeit eines Simulationsexperiments, die Benutzerfreundlichkeit sowie die Visualisierung der Ergebnisse weiter zu verbessern. AnyLogic bietet hier zwar einige Vorteile gegenüber anderen Simulationsumgebungen, allerdings können mit entsprechender professioneller Unterstützung weitere Performanzpotentiale gehoben. Zudem könnten softwareseitige Verbesserungen implementiert werden, die den Umfang der Programmierkenntnisse und -fähigkeiten des Autors übersteigen. Im Ergebnis könnte dadurch ein **Entscheidungsunterstützungssystem zur Planung und Dimensionierung** von Systemen zur Energieversorgung während der Fahrt für **verschiedene Anwendungsfälle, Planungsräume und -träger** entstehen.

### **Inhaltliche Erweiterungen des Verfahrens**

Ein Anknüpfungspunkt zur **inhaltlichen Weiterentwicklung des Anwendungsfalls bzw. der konkreten Ausgestaltung des Verfahrensteils Güterverkehrsnachfrage** könnte sein, die Abschnitt 2.2.1.2 vorgestellte **Logistik-Standortdatenbank** zu verwenden, um auf Basis von flächen- oder arbeitskräftebezogenen Aufkommensraten ein **Verkehrsaufkommen** zu erzeugen, zu verteilen und dann feiner disaggregiert als bisher möglich auf das Verkehrsnetzmodell umzulegen. Hierdurch würden realistische Relationen auf Knotenebene entstehen, die die Verhältnisse im Vor- oder Nachlauf vom übergeordneten Straßennetz exakter abbilden würden. Entsprechende Aufkommensraten je Standort könnten auf Basis von Verkehrserhebungen gewonnen werden oder aus anderen Datenquellen gewonnen werden. Zum Beispiel könnten GPS-Positionsdaten aus Navigationssystemen, die kommerziell erwerbbar sind, mittels der Methoden der Geoinformatik auf Standorte und dem Verkehrsnetzmodell verortet werden (Bartelme 2000). Zudem könnte im Rahmen von **Forschungskooperationen mit Logistikdienstleistern** auf deren Datenbestand zu Sendungen und Fahrzeugbewegungen zurückgegriffen werden um auf dieser Basis zumindest sektorale Aussagen treffen zu können. Gerade im **Stückgut- oder KEP-Segment** könnten auf Basis dieser Daten interessante Erkenntnisse zu

---



---

Netzkonfigurationen abgeleitet werden, da diese Segmente in hohem Maße auf regelmäßig **verkehrende und flächendeckende Linienverkehre** zurückgreifen.

Ein weiterer Anknüpfungspunkt besteht mit Blick auf einen weiteren Verkehrsträger. Mit dem **Schienengüterverkehrsnetz** existiert ein schon weitgehend auf elektrischen Antrieben beruhender Verkehrsträger, der seine Vorteile insbesondere bei langlaufenden, gebündelten Transporten mit standardisierten Transporteinheiten (z.B. Containern) ausspielen kann. Offenbar scheint das System jedoch mit Blick auf den relativ geringen Marktanteil nicht den Anforderungen der Logistikbranche vollkommen gerecht werden zu können. Es stellt sich also die überaus interessant erscheinende **Forschungsfrage, wie sich Systeme zur Energieversorgung** während der Fahrt auf der einen Seite und der **Schienengüterverkehr** auf der anderen Seite im Rahmen eines **intermodalen Ansatzes** bestmöglich **ergänzen** können, da vor dem Hintergrund eines angenommenen Netzausbaus mit Systemen zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt die öffentliche Hand über zwei in Teilen redundante Netze verfügen würde, die im Wege der Nutzerfinanzierung den Maßstäben der Wirtschaftlichkeit gerecht werden müssten.

Aus **methodischer Sicht** müsste das im Rahmen dieser Arbeit **vorgestellte, simulationsbasierte Optimierungsverfahren** um eine **weitere Netzebene** ergänzt werden: das **Transportangebot im Schienengüterverkehrsnetz**. Dies umfasst neben den intermodalen **Umschlagbahnhöfen** auch den Schienengüterverkehr in Form **strategischer Fahrpläne**. Durch die Ergänzung weiterer Verfahrensschritte, die z.B. ein Modul zur **Verkehrsmittelwahl** und eines zur **Verkehrsumlegung** im Schienennetz umfassen könnten, könnten so mit Hilfe des Verfahrens verkehrsplanerische Handlungskonzepte bewertet werden, die dem **Schienengüterverkehr** auf den **Fernverkehrsrelationen** einen Vorrang einräumen während die Netzgestaltung für **Systeme zur Energieversorgung** von Lkw während der Fahrt die **Vor- und Nachlaufstrecken** abdecken kann. Auf dieser Basis könnten **verkehrsträgerübergreifende Netzkonfigurationen** abgeleitet werden, die die Netzausstattung von Systemen zur Energieversorgung während der Fahrt zunächst nur im Rahmen regionaler Konzentrationen vorsehen. Dadurch könnten auch Kosteneinsparungs- und weitere Emissionsminderungspotentiale gehoben werden. Zudem können lokale Schadstoffemissionen vermieden werden.

Ein ebenfalls lohnenswert erscheinender, weiterer Forschungsstrang könnte in der **Einbeziehung des Personenverkehrs bzw. weiterer Nutzfahrzeugarten** in das hier **vorgestellte Verfahren** bestehen. Der offensichtlichste erste Anknüpfungspunkt besteht hinsichtlich des Planungsraums Deutschland in der Berücksichtigung der seit der Marköffnung im Jahre 2012 entstandenen **Fernbuslinien**, die sich weitgehend des Autobahn- und Bundesstraßennetzes im Hauptlauf zwischen den verschiedenen Haltestellen bedienen. Dazu könnten auf Basis von **Fahrplandaten** der größten Anbieter, die öffentlich zugänglich bzw. in digitalisierter Form auch kommerziell erwerbbar sind, **Busfahrten zwischen den Netzeinspeiseknoten im Verfahrensteil Lageermittlung** abgebildet werden. Bezüglich des *eHighway*-Anwendungsfalls in Deutschland könnten so diejenigen Ladestationen, die allein unter Berücksichtigung des Straßengüterverkehrs kein positives Nutzen-Kosten-Verhältnis aufweisen, unter Einbeziehung von Fernbussen die **Wirtschaftlichkeitsschwelle** überwinden. Zudem könnte sich die **Prioritätenreihung** verschiedener Ausbauprojekte auf Grund des Fernbusverkehrs verändern

Auch der **motorisierte Individualverkehr (MIV)** könnte in den **Verfahrensteil Lageermittlung** ohne größeren Aufwand integriert werden. Um bei einer Softwareanwendung die Laufzeit nicht unnötig zu

---

verlängern, könnten **Aggregate von Fahrten zwischen Netzeinspeiseknoten** im Simulationsexperiment berücksichtigt werden, die vorher im Rahmen der klassischen Verkehrsnachfragemodellierung bestimmt worden sind. Die weiter oben verwendete BVWP-Verflechtungsmatrix bildet hierfür eine gute Grundlage, prinzipiell könnte auch das in Kapitel 6.2.1. beschriebene Verfahren zur Disaggregation auf die LAU-Ebene verwendet werden, das weiter auf die Bedürfnisse und Anforderungen der Personenverkehrsnachfragemodellierung angepasst werden kann.

Aus **volkswirtschaftlicher Sicht** entstehen sowohl auf Seiten der **Infrastrukturbetreiber** (z.B. der Staat oder ein privatwirtschaftliches Unternehmen) als auch auf Seiten der **Nutzer monetäre Aufwände**. Der Infrastrukturbetreiber trägt **Bau- und Betriebskosten** der infrastrukturseitigen Komponenten eines Systems. Die Nutzer tragen die **fahrzeugseitigen Kosten**, also z.B. die Mehraufwände bei der Fahrzeugbeschaffung und die Kosten für den Fahrzeugbetrieb. Die Fahrzeugbeschaffungsmehrkosten steigen in aller Regel mit der Kapazität des Energiespeichers. Hierdurch können die Kosten auf Seiten des Infrastrukturbetreibers allerdings fallen (durch einen geringeren Streckenausstattungsgrad). Umgekehrt wirken sich Investitionen in den Netzausbau durch den Infrastrukturbetreiber senkend auf die notwendige Kapazität des Energiespeichers und damit auf die Mehrkosten der Fahrzeugbeschaffung aus. Daher kann davon ausgegangen werden, dass es ein **volkswirtschaftliches Optimum** des Streckenausstattungsgrads einerseits sowie der Fahrzeugbeschaffungsmehrkosten aller Nutzer andererseits existiert. Hier ergeben sich interessante Perspektiven für weitere Forschungsvorhaben bzw. zur Erweiterung des vorgestellten Verfahrens.

#### **Anwendungsfall: Systeme zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt in Deutschland**

Mit Blick auf den deutschen Planungsraum wurden bisher bereits **einige wenige grundlegende Arbeiten** veröffentlicht (siehe Abschnitt 6.1). Diese Arbeiten widmeten sich Fragestellungen wie z.B. der vergleichenden **Bewertung der Vorteilhaftigkeit verschiedener alternativer Fahrzeugantriebs- und Energieversorgungssysteme**. Hierbei wurden z.B. Verbrennungsmotoren mit synthetischem Kraftstoff oder Wasserstofffahrzeuge mit OH-Lkw verglichen. Ein **Vergleich der OH-Lkw mit anderen Systemen zur Energieversorgung während der Fahrt**, der aus Sicht eines möglichst rationalen Einsatzes finanzieller Mittel jedoch geboten erscheint, fand hier jedoch nicht statt. Zudem wurden Konzepte für den Netzausbau oder Netzkonfigurationen bisher nur für den *eHighway* in Deutschland erarbeitet.

Daher sind Aussagen zum **sinnvollsten System** für Deutschland **aus gesamtgesellschaftlich-volkswirtschaftlicher Perspektive** bisher nicht möglich. Das in dieser Arbeit **vorgestellte Verfahren** kann für eine solche **Untersuchung** einen wertvollen Baustein darstellen. Im Sinne des **Verkehrsplanungsprozesses**, der die Wirkungen einzelner Maßnahmen und Handlungskonzepte im Hinblick auf ein vorab zu definierendes Zielsystem ermitteln kann, sollte hier ein **analoges Vorgehen** für **alle Systeme** erfolgen. Die so ermittelten **Wirkungen** der einzelnen Systeme können dann in ein **transparentes Bewertungsverfahren** eingebettet werden. Hier bietet sich also unmittelbar ein interessantes Feld für **weitere Arbeiten** unter **Nutzung und Anwendung** des hier **entwickelten Verfahrens** an. In diesem Kontext bietet es sich auch an, die **Zielfunktion** der **Optimierungskomponente** im Rahmen der beschriebenen **Variante** umzugestalten und eine **Kostenminimierung** unter **Einhaltung** bestimmter **CO<sub>2</sub>-Emissionseinsparungsgrenzwerte** zu untersuchen.

---



---

Neben dem *eHighway*-System, das in Deutschland im Wege dreier Feldversuche zur Marktreife weiterentwickelt werden soll, sollten also auch **weitere Systeme mit hohem technologischem Reifegrad** wie z.B. OLEV im deutschen Straßenraum erprobt werden. Diese Feldversuche liefern auf Basis umfangreicher Erhebungskonzepte und Auswertungssysteme, wie z.B. für den *eHighway*-Feldversuch *ELISA* in Hessen, eine wertvolle **Datengrundlage** für die weitere wissenschaftliche Arbeit. Damit ist die Durchführung solcher Feldversuche eine **notwendige Voraussetzung** für die beschriebene, **vergleichende Bewertung verschiedener Systeme**.

### 7.2.2. Politische Handlungsempfehlungen

Systeme zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt stellen einen **vielversprechenden Pfad** hin zu einem **umweltfreundlicheren Straßengüterverkehr** dar. Eine wesentliche Voraussetzung zu einem weitgehend CO<sub>2</sub>-emissionsfreien Straßengüterverkehr ist dabei, dass der umgesetzte **Traktionsstrom** auch aus **regenerativen Energiequellen oder der Kernenergie** gewonnen wird. Auf dem Weg zu einer flächendeckenden Einführung solcher Systeme bedarf es einerseits einer **intensiven wissenschaftlichen Begleitung** durch weitere Forschungsanstrengungen auf diesem relativ jungen Gebiet. Einige Anstöße wurden im vorangestellten Abschnitt gegeben. Andererseits sollten in Bezug auf den weiteren Netzausbau in Deutschland **einige wesentliche Aspekte** beachtet werden. Diese **politischen Handlungsimplicationen** lassen sich unmittelbar aus den Erkenntnissen dieser Arbeit ableiten.

#### **eHighway: Weitere Nutzergruppen erschließen**

Systeme zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt können auch mit dem Instrumentarium der **Netzwerkökonomik** analysiert werden. Das hier anwendbare **Metcalf-Gesetz** hat zur Folge, dass die Nutzerkosten (also die Summe der Bau- und Betriebskosten des Netzwerkes verteilt über die Anzahl aller Nutzer) mit der Anzahl der an das Netzwerk angeschlossenen Nutzer sinken (Hofmann 2001). Demnach sollten also **möglichst viele Nutzergruppen** von einem System zur Energieversorgung während der Fahrt profitieren können. Hinsichtlich weiterer potentieller Nutzergruppen für das derzeit in Deutschland erprobte *eHighway*-System fällt zum Beispiel der **Fernbusverkehr** ins Auge. Mit vergleichsweise **geringem Mehraufwand** könnten die in den Lkw verbauten **Systemkomponenten** auch **für den Einsatz in Bussen** adaptiert werden.

Allerdings werden die **Beschaffungskosten** der Basisfahrzeuge zur **Umrüstung in Oberleitungs-Hybridbusse** überhaupt nicht bzw. die anfallenden Umrüstungskosten nur zu einem Teil durch existierende forschungspolitische Förderinstrumente getragen. Da Reisebusse **hohe Raum- und damit Sitzplatzeinbußen** erfahren würden, wenn sie mit *eHighway*-Komponenten ausgestattet werden sollen, entstünde nach **Ablauf** entsprechender **Feldversuche** zudem das Risiko des **vollständigen Wertverlustes** der Fahrzeuge da sich diese im regulären Liniendienst als unwirtschaftlich erweisen würden. Angesichts der hohen Kosten der Umrüstung einerseits sowie des wirtschaftlichen Risikos auf der anderen Seite bestehen also aus forschungspolitischer Perspektive noch Umsetzungshemmnisse. **Marktgerechte Förderrichtlinien** könnten daher dazu führen, dass prinzipiell interessierte Unternehmen grundlegende technische Entwicklungsaufgaben nicht noch aus eigenen Mitteln bestreiten müssten und so zur Erschließung einer weiteren Nutzergruppe für das *eHighway*-System beitragen.

---

## Transparenten und ergebnisoffenen Systemvergleich anstoßen

Auf Grund der konduktiven Energieübertragung von oben, die das **eHighway-System** kennzeichnet, ist es **nicht zur Nutzung durch den MIV geeignet**. Idealerweise sollte ein System zur Energieversorgung des Elektroverkehrs während der Fahrt nicht nur durch einige wenige Verkehrsteilnehmergruppen genutzt werden können, sondern durch möglichst viele dieser Gruppen, wodurch entstehende Netzwerkeffekte umfangreicher ausfallen können. Zudem werden im ungünstigsten Fall Effizienzsteigerungs- und Emissionsminderungspotentiale auf gesamtgesellschaftlicher Ebene nicht ausgeschöpft. Aus diesem Grund erscheint ein **transparenter und ergebnisoffener Systemvergleich** geboten, für den diese Arbeit mit dem vorgestellten, systemunabhängigen Lösungsverfahren einen Beitrag liefern kann. Der **Verkehrsplanungsprozess** bietet hierfür einen etablierten und strukturierten **Referenzrahmen**.

**Schweden** beschreitet hinsichtlich der Systeme zur Energieversorgung des Elektroverkehrs während der Fahrt zum Beispiel einen **technologieunabhängigen Weg** und testet zu Vergleichszwecken unterschiedliche Systeme, um im Rahmen eines nationalen Aktionsplans dasjenige System zu finden, das sich am besten für den schwedischen Straßenraum bzw. die dortigen Verkehrsverhältnisse eignet (Pettersson *et al.* 2017). Dieses Beispiel politischen Handelns ist insofern relevant, als dass sich die politischen Akteure in **Deutschland** *ex ante* auf die **Erprobung** und **technische Weiterentwicklung** von lediglich **einem der vielen unterschiedlichen** Systeme zur Energieversorgung des Elektroverkehrs während der Fahrt festgelegt zu haben scheinen, **ohne** dass ein **umfassender Systemvergleich** stattgefunden hätte.

## Nutzerakzeptanz fördern

Darüber hinaus sollte durch politische Entscheidungsträger bedacht werden, dass Systeme zur Energieversorgung des Elektroverkehrs während der Fahrt nur bei bestehender **Akzeptanz durch die vorgesehenen Nutzergruppen** erfolgreich eingeführt werden können. In Bezug auf die deutsche Logistikbranche erhöht sich die Akzeptanz eines Systems wegen des hochkompetitiven Wettbewerbsumfelds im Straßengüterverkehr dann beträchtlich, wenn die zu erwartenden Mehrkosten der Systemfinanzierung durch entsprechende Betriebskostensparnisse übertroffen werden können (siehe auch Jöhrens *et al.* 2018; Hacker *et al.* 2020). Dies lässt sich insbesondere auch dann realisieren, wenn die Systemkosten nicht nur durch eine Verkehrsteilnehmergruppe (den Güterverkehr), sondern auch von weiteren Nutzergruppen wie dem Fernbus- bzw. Personenverkehr mitgetragen werden.

Das im Laufe dieser Arbeit vorgestellte, simulationsbasierte Optimierungsverfahren ist prinzipiell auch auf den Pkw-Verkehr und weitere Nutzergruppen anwendbar und leistet somit einen Beitrag für eine **vergleichende, volkswirtschaftliche Bewertung verschiedener Systeme** zur Energieversorgung des Elektroverkehrs während der Fahrt. Langfristig kann die gesamtgesellschaftliche Akzeptanz der Systeme zur Energieversorgung des Elektroverkehrs während der Fahrt durch einen solchen, möglichst Bewertungsprozess gesteigert und die Weichen für einen nachhaltigen Straßenverkehr können gestellt werden.

---

---

## Literaturverzeichnis

---

- Aberle, G. (2009):** Transportwirtschaft. Einzelwirtschaftliche und gesamtwirtschaftliche Grundlagen. 5., überarbeitete und ergänzte Auflage, München.
- Affenzeller, M., Beham, A., Vonolfen, S., Pitzer, E., Winkler, S.M., Hutterer, S., Kommenda, M., Kofler, M., Kronberger, G. und Wagner, S. (2015):** Simulation-Based Optimization with HeuristicLab. Practical Guidelines and Real-World Applications. In: Mujica Mota, M., La Mota, I.F. de, Guimarans Serrano, D., Serrano, D.G. und Mota, M.M. (Hg.): Applied Simulation and Optimization in Logistics, Industrial and Aeronautical Practice. Cham (Schweiz), S. 3-38.
- Aghamanoukjan, A., Buber, R. und Meyer, M. (2009):** Qualitative Interviews. In: Buber, R. und Holzmüller, H.H. (Hg.): Qualitative Marktforschung. Konzepte, Methoden, Analysen. 2., überarbeitete Auflage, Wiesbaden, S. 415-437.
- Ahn, S. (2017):** Shielding of Magnetic Field. In: Suh, N.P. und Cho, D.H. (Hg.): The On-line Electric Vehicle: Wireless Electric Ground Transportation Systems, Springer International Publishing, Cham (Schweiz), S. 197–206.
- Ahn, S. (2017a):** Magnetic Field Generation. In: Suh, N.P. und Cho, D.H. (Hg.): The On-line Electric Vehicle: Wireless Electric Ground Transportation Systems, Cham (Schweiz), S. 81–96.
- Ahn, S. (2017b):** On-Line Electric Vehicle (OLEV). Project and Vehicular Wireless Power Transfer Technology. HEV TCP Task 26 Workshop, Tagungsbeitrag, Versailles (Frankreich).
- Akerkar, R. und Sajja, P.S. (2016):** Other Metaheuristics and Classification Approaches. In: Akerkar, R. und Sajja, P.S. (Hg.): Intelligent Techniques for Data Science. Cham (Schweiz), S. 185–209.
- Alaküla, M. und Marquez-Fernandez, F.J. (2017):** Dynamic charging solutions in Sweden. An overview. In: 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 07.-10. August 2017, Tagungsort: Harbin (China), Beitrag im Tagungsband. Piscataway (USA), S. 1–6.
- Alaküla, M. (2017):** The Use of Batteries in Transportation. Lund (Schweden).
- Aleksic, M. (2012):** Dynamische Umlegung von Quelle-Ziel-Matrizen mit einem makroskopischen Verkehrsflussmodell. Wiesbaden.
- Alonso, A., Coosemans, T., Perlo, P., Comoglio, M., Otella, M., Reeves, C., Bierau, F., Mueller, B., Meyer, G., Köhler, U., Feyder, C., Gallego, I., Chefneux, M., Zegers, P. und Deix, S. (2016):** GO4SEM. Recommendations to Support Innovation Links for Entering Global e-Mobility Markets. Transportation Research Procedia, Jg. 14, S. 3667–3675.
- Amaran, S., Sahinidis, N.V., Sharda, B. und Bury, S.J. (2016):** Simulation optimization. A review of algorithms and applications. Annals of Operations Research, Jg. 240, Heft 1, S. 351–380.
- Amditis, A., Karaseitanidis, G., Damousis, I., Guglielmi, P. und Cirimele, V. (2016):** Dynamic Wireless Charging for More Efficient FEVs. The Fabric Project Concept. In: MedPower 2014, 02.-05. November 2015, Athen (Griechenland), Beitrag im Tagungsband, Piscataway (USA), S. 6-29.
- Ammoser, H. und Hoppe, M. (2006):** Glossar Verkehrswesen und Verkehrswissenschaften: Definitionen und Erläuterungen zu Begriffen des Transport- und Nachrichtenwesens. Diskussionsbeiträge aus dem Institut für Wirtschaft und Verkehr, Technische Universität Dresden, Dresden.
- Andorfer, D. (1970):** Infrastrukturinvestitionen in die Bildung und in Verkehrsanlagen Planung, Kosten und Erträge. Zeitschrift für Nationalökonomie, Jg. 30, Heft 3/4, S. 491-503.
- Angelidis, E., Bohn, D. und Rose, O. (2013):** A simulation tool for complex assembly lines with multi-skilled resources. In: Pasupathy, R. (Hg.): Winter Simulation Conference 2013 (WSC), 08. - 11. Dezember 2013, Washington, DC (USA), Beitrag im Tagungsband, S. 2577-2586.

- 
- Arenas, L.F., Ponce de León, C. Walsh, F.C. (2017):** *Engineering aspects of the design, construction and performance of modular redox flow batteries for energy storage*. In: *Journal of Energy Storage*. Heft 11, S. 119–153.
- Arns, M., Buchholz, P. und Müller, D. (2009):** Optimierung ereignisdiskreter Simulationsmodelle im ProC/B-Toolset. In: Buchholz, P. und Clausen, U. (Hg.): *Große Netze der Logistik. Die Ergebnisse des Sonderforschungsbereichs 559*, Berlin, S. 181–209.
- Ausberg, L., Citroth, A., Feifel, S. und Franze, J. (2015):** Lebenszyklusanalysen. In: Kaltschmitt, M. und Schebeck, L. (Hg.): *Umweltbewertung für Ingenieure*, Berlin/Heidelberg, S. 203–314.
- Balster, A. (2018):** Modellierung dynamischer Güterflüsse zur Analyse von Risiken in der Lebensmittelversorgung. Dissertation am Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik, Technische Universität Darmstadt, Schriftenreihe des Instituts für Verkehr, V42, Darmstadt.
- Bandelow, N.C., Lindloff, K. und Sikatzki, S. (2016):** Governance im Politikfeld Verkehr: Steuerungsmuster und Handlungsmodi in der Verkehrspolitik. In: Schwedes, O., Canzler, W. und Knie, A. (Hg.): *Handbuch Verkehrspolitik*, 2. Auflage, Wiesbaden, S. 165–187.
- Bandow, G. und Holzmüller, H.H. (Hg.) (2010):** "Das ist gar kein Modell!". Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften. Wiesbaden.
- Barry, K. (2013):** In South Korea, Wireless Charging Powers Electric Buses. Onlineartikel. *Wired Magazine*, 08.07.2013, URL: <https://www.wired.com/2013/08/induction-charged-buses>. Letzter Zugriff am: 19.02.2019.
- Bartelme, N. (2000):** Geoinformatik. Modelle, Strukturen, Funktionen. 3., erweiterte und aktualisierte Auflage, Berlin/Heidelberg.
- Bateman, Damien, Leal, D. und Reeves, S. (2018):** Electric Road Systems: a solution for the future. TRL Academy Report PPR 875, o.O.
- Baudach, J., Voll, R., Eufinger, L., Meier, F. Sender, J., Goedicke, I. und Thaller, C. (2013):** Modellentwicklung. In: Clausen, U. und Geiger, C. (Hg.): *Verkehrs- und Transportlogistik*, 2. Auflage, Berlin/Heidelberg, S. 327–405.
- Beckmann, K.J. (2014):** Verkehrssysteme und Verkehrsanlagen. In: Zilch, K., Diederichs, C.J., Katzenbach, R. und Beckmann, K.J. (Hg.): *Raumordnung und Städtebau, Öffentliches Baurecht/Verkehrssysteme und Verkehrsanlagen*, Handbuch für Bauingenieure, Berlin, S. 2097–2303.
- Bednarczyk, T. (2012):** Linienverkehrsplanung für KEP-Dienste. Dissertation an der Fakultät für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, Universität der Bundeswehr Hamburg, Hamburg.
- Ben-Akiva, M. und de Jong, G. (2013):** The Aggregate-Disaggregate-Aggregate (ADA) Freight Model System. In: van de Voorde, E., Meersman, H. und Ben-Akiva, M.E. (Hg.): *Freight transport modelling*, Bingley (Vereinigtes Königreich), S. 69–90.
- Biesenack, H. (2006):** Energieversorgung elektrischer Bahnen. Mit 96 Tabellen. Lehrbuch Elektrotechnik, Wiesbaden.
- Blanco, R., Tuya, J. und Adenso-Díaz, B. (2009):** Automated test data generation using a scatter search approach. *Information and Software Technology*, Jg. 51, Heft 4, S. 708–720.
- Bohnsack, R. und Przyborski, A. (2009):** Gruppendiskussionsverfahren und Focus Groups. In: Buber, R. und Holzmüller, H.H. (Hg.): *Qualitative Marktforschung: Konzepte, Methoden, Analysen*, 2., überarbeitete Auflage, Wiesbaden, S. 491–507.
- Boltze, M. (1998):** Integration von städtischen und regionalen Verkehrsmanagementstrategien. VSVI-Seminar am 24.06.1998, Präsentationsfolien, Friedberg (Hessen).
- Boltze, M. (2011):** Transportmanagement. Editorial. *Straßenverkehrstechnik*, Heft 4, S. 217.
-

- 
- Boltze, M. (2013a):** Mehr Verkehrstote durch Luftschadstoffe als durch Unfälle. Editorial. Straßenverkehrstechnik, Heft 4, S. 215.
- Boltze, M. (2013b):** Transportmanagement – Güterverkehrsnachfrage stadtverträglich beeinflussen. In: Beckmann, K.J. (Hg.): Urbane Räume in Bewegung: Geschichte, Situation und Perspektive von Stadt. Für Klaus J. Beckmann zum 65. Geburtstag, Sonderveröffentlichung, Deutsches Institut für Urbanistik, Berlin, S. 277–286.
- Boltze, M. (2015):** Planung und Umsetzung von Strategien im dynamischen Verkehrsmanagement. Präsentation im Rahmen der Ringvorlesung „Kooperatives Verkehrsmanagement“, Präsentationsfolien, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig.
- Boltze, M. (2019a):** Materialien zu den Vorlesungen Verkehr II. Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwesen, Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik, 2019.
- Boltze, M. (2019b):** Oberleitungen auf Autobahnen - nicht nur einen Versuch wert! Editorial. Straßenverkehrstechnik, Heft 4, S. 242.
- Boltze, M., Jentsch, H., Friedrich, B. und Bastian, M. (2007):** OptiV. Erschließung von Entscheidungs- und Optimierungsmethoden für die Anwendung im Verkehr. Projektbericht, o. O.
- Boltze, M., Lehmann, M., Riegelhuth, G., Sommer, H. und Wauri, D. (Hg.) (2020):** Elektrifizierung von Autobahnen für den Schwerverkehr. Umsetzung des Systems eHighway. Bisher unveröffentlichtes Sammelwerk, Bonn.
- Bonart, T. und Bär, J. (2018):** Quantitative Betriebswirtschaftslehre. Band I. Grundlagen, Operations Research, Statistik, Wiesbaden.
- Borchert, M. und Heuwing-Eckerland, J. (2011):** Internationalisierung in der Kontraktlogistik. Theorie und Praxis auch für kleinere Unternehmen, Berlin/Heidelberg.
- Borken-Kleefeld, J. (2007):** Bewertungsmethoden zur Bestimmung der Umweltauswirkungen des Verkehr. Gastvortrag im Rahmen der Vorlesung "Verfahren und Modelle der Verkehrsökologie" an der Technischen Universität Dresden, Präsentationsfolien, Dresden.
- Borshchev, A. (2013):** The big book of simulation modeling. Multimethod modeling with AnyLogic 6, Chicago (USA).
- Bossel, H. (1989):** Simulation dynamischer Systeme. Grundwissen, Methoden, Programme, Wiesbaden.
- Bossel, H. (2004):** Systeme, Dynamik, Simulation. Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme, Norderstedt.
- Brauer, K.M. (1991):** Tätigkeitsbedingungen der Verkehrsbetriebe. Schriften zur Betriebswirtschaftslehre des Verkehrs. Teil 1. Unveränderter Nachdruck der 1. Auflage von 1979, Berlin.
- Braun, N. und Saam, N.J. (Hg.) (2015):** Handbuch Modellbildung und Simulation in den Sozialwissenschaften, Wiesbaden.
- Bretzke, W.-R. (2015):** Logistische Netzwerke, 3. Auflage, Berlin/Heidelberg.
- Bretzke, W.-R. und Barkawi, K. (2012):** Nachhaltige Logistik. Antworten auf eine globale Herausforderung, 2. Auflage 2012, Berlin/Heidelberg.
- Brilon, W. und Wu, N. (2000):** Kalibrierung von Zellular-Automaten für die Simulation des Verkehrsflusses. Straßenverkehrstechnik, Heft 6, S. 270.
- Bundesanstalt für Straßenwesen (2012):** Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen. Ausgabe 2012, Bergisch Gladbach.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2016a):** Der Klimaschutzplan 2050. Die deutsche Klimaschutzlangfriststrategie, Berlin. URL:



- 
- <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/nationale-klimapolitik/klimaschutzplan-2050>. Letzter Zugriff am: 30.12.2019.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2016b):** Pressemitteilung Nr. 228/16. Pariser Klimaschutzabkommen nimmt erste Hürde. URL: <https://www.bmu.de/pressemitteilung/pariser-klimaschutzabkommen-nimmt-erste-huerde>. Letzter Zugriff am: 30.12.2109. Berlin.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2017a):** Aktionsprogramm Klimaschutz. URL: <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/nationale-klimapolitik/aktionsprogramm-klimaschutz/>. Letzter Zugriff am: 22.02.2019.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2017b):** Pressemitteilung Nr. 299/17. Freie Fahrt für Test mit abgasfreien Lkw in Baden-Württemberg. URL: <https://www.bmu.de/pressemitteilung/freie-fahrt-fuer-test-mit-abgasfreien-lkw-in-baden-wuerttemberg>. Letzter Zugriff am: 18.02.2019, Berlin.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2017c):** Pressemitteilung Nr. 384/17. Dritte deutsche Teststrecke für Elektro-Lkw. URL: <https://www.bmu.de/themen/luft-laerm-verkehr/verkehr/elektromobilitaet/elektro-lastwagen>. Letzter Zugriff am: 18.02.2019, Berlin.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2018):** Pressemitteilung Nr. 129/18. Florian Pronold: "Elektro-LKWs sind reif für den Praxistest". URL: <https://www.bmu.de/pressemitteilung/freie-fahrt-fuer-test-mit-abgasfreien-lkw-in-baden-wuerttemberg>. Letzter Zugriff am: 18.02.2019, Berlin.
- Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (o.J.):** Anweisung StraßeninformationsBank (ASB). Segment: Netzeigenschaften, Version 2.04.
- Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (2014):** Verkehrsverflechtungsprognose 2030. Schlussbericht, Berlin.
- Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (2016):** Bundesverkehrswegeplan 2030, Berlin.
- Bungartz, H.-J., Zimmer, S., Buchholz, M. und Pflüger, D. (2013):** Modellbildung und Simulation. Eine anwendungsorientierte Einführung. 2., überarbeitete Auflage, Berlin/Heidelberg.
- Buthe, B. (2017):** Integration raumordnerischer Belange in die Verkehrsplanung. Eine überörtliche Analyse auf Basis der Input-Output-Rechnung. Dissertation an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster, Wiesbaden.
- Cardeneo, A. (2008a):** Kurier-, Express- und Paketdienste. In: Arnold, D., Isermann, H., Kuhn, A., Tempelmeier, H. und Furmans, K. (Hg.): Handbuch Logistik. Berlin/Heidelberg, S. 782–788.
- Cardeneo, A. (2008b):** Straßengüterverkehr, Speditionen, Logistik-Dienstleistungen. In: Arnold, D., Isermann, H., Kuhn, A., Tempelmeier, H. und Furmans, K. (Hg.): Handbuch Logistik. Berlin/Heidelberg, S. 727–735.
- Cascetta, E. (2009):** Transportation Systems Analysis. Models and Applications. Reihe Optimization and Its Applications, Heft 29, o.O.
- Collin, H.-J. (2005):** Erhebungen zur Verkehrsnachfrage. In: Steierwald, G., Künne, H.D. und Vogt, W. (Hg.): Stadtverkehrsplanung. Berlin/Heidelberg, S. 80–140.
- Combes, F. (2013):** Inventory Theory and Freight Transport Modelling. In: Tavasszy, L. und de Jong, G. (Hg.): Modelling Freight Transport. Burlington (Vereinigtes Königreich), S. 89–115.
- Connolly, D. (2016):** A comparison between oil, battery electric vehicles, and electric roads for Danish road transport in terms of energy, emissions, and costs. Working Paper, Aalborg.
- Cormen, T.H., Molitor, P. und Lippert, K. (2004):** Algorithmen. Eine Einführung, München.
-

- 
- Dabidian, P. und Langkau, S. (2013):** Straßengüterverkehr. In: Clausen, U. und Geiger, C. (Hg.): Verkehrs- und Transportlogistik. 2. Auflage, Berlin/Heidelberg, S. 137–161.
- Dantzig, G. (1987):** Origins of the Simplex method. Technical Report SOL 87-5, Stanford (USA).
- Decker, M. und Schippl, J. (2015):** Technikfolgenabschätzung. In: Kaltschmitt, M. und Schebeck, L. (Hg.): Umweltbewertung für Ingenieure. Berlin/Heidelberg, S. 403–437.
- Deckert, A. (2012):** Simulationsbasierte Optimierung einer agentenbasierten Simulation mit Anwendungen zur Preisoptimierung im Mobilfunk. Dissertation an der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät, Universität Augsburg, Augsburg.
- Deiters, J. (2007):** Güterverkehr zwischen Wachstum und Nachhaltigkeit. In: Nobis, C. und Lenz, B. (Hg.): Wirtschaftsverkehr: alles in Bewegung? Studien zur Mobilitäts- und Verkehrsforschung. Mannheim, S. 229–244.
- Dempe, S. und Schreier, H. (2006):** Operations Research. Deterministische Modelle und Methoden. Wiesbaden.
- Deutsches Institut für Normung (2016):** Raumfahrtsysteme. Definition des Technologie-Reifegrades (TRL) und der Beurteilungskriterien. DIN ISO 16290:2016-09, Berlin.
- Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (2017):** Verkehr in Zahlen 2017/18, 45. aktualisierte Neuauflage, revidierte Ausgabe, Hamburg.
- Deymann, S. (2011):** Entwicklung eines Vorgehens zur Groblayoutplanung von Stückgutspeditionsanlagen. Reihe Logistik, Verkehr und Umwelt, Dortmund.
- Dillow, C. (2010):** Korea's Online Electric Vehicle Gathers Power From The Road Through Wireless Induction. Onlineartikel. Popular Science, 10.03.2010, URL: <https://www.popsci.com/cars/article/2010-03/koreas-online-electric-vehicle-gathers-power-road-wirelessly>. Letzter Zugriff am: 19.02.2019.
- Domschke, W., Drexl, A., Klein, R. und Scholl, A. (2015):** Einführung in Operations Research. 9., überarbeitete und verbesserte Auflage 2015, Berlin/Heidelberg.
- Domschke, W. und Scholl, A. (2006):** Heuristische Verfahren. Arbeits- und Diskussionspapiere der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität Jena. Jenaer Schriften zur Wirtschaftswissenschaft, Jena.
- Döring, N. und Bortz, J. (2016):** Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften. 5. vollständig überarbeitete, aktualisierte und erweiterte Auflage, Berlin/Heidelberg.
- Du, K.-L. und Swamy, M.N.S. (2016):** Search and Optimization by Metaheuristics. Techniques and Algorithms Inspired by Nature. Cham (Schweiz).
- Duarte, A., Laguna, M. und Martí, R. (2018a):** Black-Box Solvers. In: Duarte, A., Laguna, M. und Martí, R. (Hg.): Metaheuristics for business analytics: A decision modeling approach. Cham (Schweiz), S. 105–136.
- Duarte, A., Laguna, M. und Martí, R. (Hg.) (2018b):** Metaheuristics for business analytics: A decision modeling approach. Cham (Schweiz).
- Egea, J.A., Vazquez, E., Banga, J.R. und Martí, R. (2009):** Improved scatter search for the global optimization of computationally expensive dynamic models. Journal of Global Optimization, Jg. 43, Heft 2-3, S. 175–190.
- Eley, M. (2012):** Simulation in der Logistik. Einführung in die Erstellung ereignisdiskreter Modelle unter Verwendung des Werkzeuges "Plant Simulation". Berlin/Heidelberg.
- Eskandari, H., Mahmoodi, E., Fallah, H. und Geiger, C.D. (2011):** Performance analysis of commercial simulation-based optimization packages: Optquest and Witness Optimizer.



- 
- Präsentationsfolien, Präsentation im Rahmen der Winter Simulation Conference 2011, 11. bis 14. Dezember, Phoenix, Arizona (USA).
- Fees, E. (2018):** Komplexität. In: Gabler Verlag (Hg.): Gabler Wirtschaftslexikon. o.O.
- Feldmann, M. (1999):** Naturanaloge Verfahren. Metaheuristiken zur Reihenfolgeplanung. Schriften zur quantitativen Betriebswirtschaftslehre, Wiesbaden.
- Fleischmann, B. (2008):** Grundlagen: Begriff der Logistik, logistische Systeme und Prozesse. In: Arnold, D., Isermann, H., Kuhn, A., Tempelmeier, H. und Furmans, K. (Hg.): Handbuch Logistik. Berlin/Heidelberg, S. 4–12.
- Fornauf, L. (2015):** Entwicklung einer Methodik zur Bewertung von Strategien für das dynamische Straßenverkehrsmanagement. Dissertation am Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik, Technische Universität Darmstadt, Schriftenreihe des Instituts für Verkehr, V33, Darmstadt.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2001):** Leitfaden für Verkehrsplanungen. FGSV, Aug. 2001, Köln.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2008):** Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA), Köln.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2009):** Handbuch für die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen. HBS. Aug. 2001, Fassung 2009, Köln.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2010):** Hinweise zu Einsatzbereichen von Verfahren zur Entscheidungsfindung in der Verkehrsplanung. FGSV W1 - Wissensdokumente, Aug. 2010, Köln.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2012a):** Begriffsbestimmungen. Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen. FGSV, Aug. 2012, Köln.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2012b):** Empfehlungen für Verkehrserhebungen. EVE. FGSV R2 - Regelwerke, Aug. 2012, Köln.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2012c):** Hinweise zur Beteiligung und Kooperation in der Verkehrsplanung. FGSV W1 - Wissensdokumente, Aug. 2012, Köln.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2012d):** Hinweise zur Evaluation von verkehrsbezogenen Maßnahmen. FGSV W1 - Wissensdokumente, Aug. 2012, Köln.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2013):** Hinweise zur Verkehrsentwicklungsplanung. FGSV W1 - Wissensdokumente, Aug. 2013, Köln.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2015):** Richtlinien für Lichtsignalanlagen, Aug. 2015.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2018):** Empfehlungen für Verkehrsplanungsprozesse. FGSV R2 - Regelwerke, Ausgabe 2018, Köln.
- Franke, T. und Krems, J.F. (2013):** What drives range preferences in electric vehicle users? Transport Policy, Jg. 30, S. 56–62.
- Friedrich, H. (2010):** Simulation of Logistics in Food Retailing for Freight Transportation Analysis. Dissertation, Lehrstuhl für Netzwerkökonomie, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.
- Friedrich, H. und Liedtke, G. (2009):** Consideration of Logistics for Policy Analysis with Freight Transport Models. Präsentation auf dem Infraday 2009, Präsentationsfolien, Berlin.
- Friedrich, H., Liedtke, G. und Spahn, M. (2007):** Die Relation zwischen Wirtschaftsakteuren als zukünftige Bezugsgröße für mikroskopische Güterverkehrsmodelle. In: Clausen, U. (Hg.): Wirtschaftsverkehr 2007: Modelle, Strukturen, Umsetzung. Reihe Logistik, Verkehr und Umwelt, Dortmund, S. 25–34.
- Fu, M.C. (2002):** Optimization for simulation: Theory vs. Practice. INFORMS Journal on Computing, Jg. 14, Heft 3, S. 192–215.
-

- 
- Fu, M.C., Glover, F.W. und April, J. (2005):** Simulation Optimization. A Review, New Developments, and Applications. In: Kuhl, M.E. (Hg.): Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference, New York (USA), S. 83–95.
- Geistefeldt, J., Hohmann, S. und Estel, A. (2017):** Ermittlung der geeigneten Verkehrsnachfrage als Bemessungsgrundlage von Straßen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Reihe Verkehrstechnik, Bremen.
- Gerdes, I., Klawonn, F. und Kruse, R. (2004):** Evolutionäre Algorithmen. Genetische Algorithmen, Strategien und Optimierungsverfahren, Beispielanwendungen. Wiesbaden.
- Geschka, H. (2006):** Szenariotechnik als Instrument der Frühaufklärung. In: Gassman, O. und Kobe, C. (hg.): Management von Innovation und Risiko: Quantensprünge in der Entwicklung erfolgreich managen. Berlin, S. 357–372.
- Geschka, H. und Hammer, R. (1990):** Die Szenario-Technik in der strategischen Unternehmensplanung. In: Hahn, D. und Taylor, B. (Hg.): Strategische Unternehmensplanung / Strategische Unternehmensführung: Stand und Entwicklungstendenzen. 5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Heidelberg, S. 311–336.
- Gillenkirch, R. (2018):** System. In: Gabler Verlag (Hg.): Gabler Wirtschaftslexikon, o.O.
- Gleißner, H. und Femerling, C. (2016):** Kompakt Edition: Transport. Elemente - Management - Märkte, Wiesbaden.
- Gleißner, H. und Möller, K. (2009):** Fallstudien Logistik. Logistikwissen in der praktischen Anwendung, Wiesbaden.
- Glover, F. (1977):** Heuristics for Integer Programming using surrogate constraints. Decision Sciences, Jg. 8, Heft 1, S. 156–166.
- Glover, F. (1998):** A template for scatter search and path relinking. In: Hao, J.-K., Lutton, E., Ronald, E., Schoenauer, M. und Snyers, D. (Hg.): Artificial Evolution: Third European Conference AE '97 Nîmes(France), October 22-24, 1997 Selected Papers, Berlin/Heidelberg, S. 1–51.
- Glover, F., Kelly, J.P. und Laguna, M. (1999):** New advances for wedding optimization and simulation. In: o. Hg. (Hg.), Winter Simulation Conference 1999, Phoenix (USA), Tagungsband, S. 255–260.
- Göhlich, D., Fay, T.-A., Jefferies, D., Lauth, E., Kunith, A. und Zhang, X. (2018):** Design of urban electric bus systems. Design Science, Jg. 4.
- Göpfert, I. (2013):** Logistik. Führungskonzeption und Management von Supply Chains. 3., aktualisierte und erweiterte Auflage, München.
- Gosavi, A. (2015):** Simulation-Based Optimization. Parametric Optimization Techniques and Reinforcement Learning. Operations Research/Computer Science Interfaces Series. 2. Auflage, New York (USA).
- Götze, U. (1993):** Szenario-Technik in der strategischen Unternehmensplanung. 2., aktualisierte Auflage, Wiesbaden.
- Grigoryev, I. (2016):** AnyLogic 7 in three days. A quick course in simulation modeling. 3. Auflage, Breslau (Polen).
- Grünert, T. und Irnich, S. (2005a):** Optimierung im Transport. Band I: Grundlagen, Aachen.
- Grünert, T. und Irnich, S. (2005b):** Optimierung im Transport. Band II: Wege und Touren, Aachen.
- Gudehus, T. (2012):** Logistik 1. Grundlagen, Verfahren und Strategien. 4. Auflage.
- Hacker, F., Blanck, R., Görz, W., Bernecker, T., Speiser, J., Röckle, F., Schubert, M. und Neubauer, G. (2020):** StratON. Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge. Projektendbericht, Berlin.

- 
- Haefeli, U. (2016):** Entwicklungslinien deutscher Verkehrspolitik im 19. und 20. Jahrhundert. In: Schwedes, O., Canzler, W. und Knie, A. (Hg.): Handbuch Verkehrspolitik. 2. Auflage 2016, Wiesbaden, S. 97–115.
- Halbey, J., Philipsen, R., Schmidt, T. und Ziefle, M. (2018):** Range Makes All the Difference? Weighing up Range, Charging Time and Fast-Charging Network Density as Key Drivers for the Acceptance of Battery Electric Vehicles. In: Stanton, N. (Hg.), Advances in human aspects of transportation: Proceedings of the AHFE 2017 International Conference on Human Factors in Transportation, July 17–21, 2017, The Westin Bonaventure Hotel, Los Angeles, California, USA, Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer, Cham, S. 939–950.
- Hanley, S. (2017):** China Opens 1-Kilometer Long Solar Road. Clean Technica, 30.12.2017, URL: <https://cleantechnica.com/2017/12/30/china-opens-1-kilometer-long-solar-road>. Letzter Zugriff am: 09.02.2019.
- Hanusch, H., Ilg, G. und Jung, M. (2011):** Nutzen-Kosten-Analyse. 3., vollständig überarbeitete Auflage, München.
- Hartmann, C. (2016):** Schweden: Erster öffentlicher eHighway geht an den Start. Onlineartikel. Transport, 22.06.2016, URL: <https://transport-online.de/news/schweden-erster-oeffentlicher-ehighway-geht-den-start-10228.html>. Letzter Zugriff am: 23.02.2019.
- Häuslein, A. (2004):** Systemanalyse. Grundlagen, Techniken, Notierungen, Berlin.
- Hedtstück, U. (2013):** Simulation diskreter Prozesse. Methoden und Anwendungen. Berlin/Heidelberg.
- Heinrich, G. (2007):** Allgemeine Systemanalyse. Reihe Wirtschaftsinformatik kompakt, München.
- Hesse, C., Bohne, S., Evangelinos, C. und Püschel, R. (2012):** Erreichbarkeitsmessung: Theoretische Konzepte und empirische Anwendungen. Diskussionsbeiträge aus dem Institut für Wirtschaft und Verkehr, Technische Universität Dresden, Dresden.
- Heuser, T. und Reh, W. (2016):** Die Bundesverkehrswegeplanung. Anforderungen an die zukünftige Verkehrsinfrastrukturpolitik des Bundes. In: Schwedes, O., Canzler, W. und Knie, A. (Hg.): Handbuch Verkehrspolitik, 2. Auflage 2016, Wiesbaden, S. 237–264.
- Hoffmeyer-Zlotnik, J. (2013):** Regionale Einheiten und Typologien von Eurostat. In: Arbeitsgruppe Regionale Standards (Hg.): Regionale Standards: Ausgabe 2013, GESIS-Schriftenreihe, S. 183–195.
- Höfler, F. (2004):** Verkehrswesen-Praxis. Band 1: Verkehrsplanung, Berlin.
- Hofmann, U. (2001):** Netzwerk-Ökonomie. Heidelberg.
- Holzmüller, H.H. und Bandow, G. (2010):** Einleitung. Zur disziplinbedingten „Färbung“ von Modellen in der Betriebswirtschaftslehre und den Ingenieurwissenschaften. In: Bandow, G. und Holzmüller, H.H. (Hg.): "Das ist gar kein Modell!": Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften. Wiesbaden, S. VII–XIV.
- Hompel, M. ten und Heidenblut, V. (Hg.) (2011):** Taschenlexikon Logistik. Abkürzungen, Definitionen und Erläuterungen der wichtigsten Begriffe aus Materialfluss und Logistik. 3., bearbeitete und erweiterte Auflage, Berlin/Heidelberg.
- Hu, A.P. (2009):** Wireless / contactless power supply. Inductively coupled resonant converter solutions. Saarbrücken.
- IFEU, PTV Transport Consult und Fraunhofer-Arbeitsgruppe SCS (2018):** Roadmap OH-Lkw: Potentialanalyse 2020-2030. Kurzfristig realisierbare Potenziale für den wirtschaftlichen Betrieb von OH-Lkw, Heidelberg.
-

- 
- IFEU, PTV Group und Fraunhofer-IEE (2018):** Vorteilhafte Einsatzfelder von Oberleitungs-Hybrid-Lkw. Ergebnisworkshop zur Potentialanalyse im Projekt „Roadmap OH-Lkw“. Unveröffentlichte Präsentation, Berlin.
- International Electrotechnical Commission (IEC) (2016):** Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets - Conductive charging of electric vehicles - Part 2: Dimensional compatibility and interchangeability requirements for a.c. pin and contact-tube accessories, IEC 62196-2:2016 Heft IEC 62196-2:2016, Berlin, Letzter Zugriff am: 20.02.2019.
- Jang, Y.J. (2018):** Survey of the operation and system study on wireless charging electric vehicle systems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Jg. 95, S. 844–866.
- Jockisch, M. und Rosendahl, J. (2010):** Klassifikation von Modellen. In: Bandow, G. and Holzmüller, H.H. (Hg.): "Das ist gar kein Modell!": Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften. Wiesbaden.
- Jöhrens, J., Rücker, J., Helms, H., Schade, W. und Hartwig, J. (2018):** Roadmap OH-Lkw: Hemmnisanalyse. Analyse technischer und logistischer Hemmnisse der OH-Lkw Technologie im Rahmen des Verbundvorhabens „Roadmap OH-Lkw“, Heidelberg.
- Jöhrens, J., Rücker, J., Kräck, J., Allekote, M. und Helms, H. (2020):** Roadmap OH-Lkw: Einführungsszenarien 2020-2030. Optimierung des Infrastrukturaufbaus für O-Lkw und Analyse von Kosten und Umwelteffekten in der Einführungsphase, Heidelberg.
- Jong, G. de, Vierth, I., Tavasszy, L. und Ben-Akiva, M. (2013):** Recent developments in national and international freight transport models within Europe. *Transportation*, Jg. 40, Heft 2, S. 347–371.
- Jung, G.H. (2017a):** Installation of Road-Embedded Power Cable. In: Suh, N.P. und Cho, D.H. (Hg.): *The On-line Electric Vehicle: Wireless Electric Ground Transportation Systems*. Cham (Schweiz), S. 159–170.
- Jung, G.H. (2017b):** Regulator. In: Suh, N.P. und Cho, D.H. (Hg.): *The On-line Electric Vehicle: Wireless Electric Ground Transportation Systems*, Cham (Schweiz), S. 187–196.
- Korean Advanced Institute of Science and Technology (o.J.):** Smart Wireless Power Transfer Technology. *The Core of the Fourth Industrial Revolution*, Daejeon (Südkorea).
- Kiefer, S. (2009):** Elektromobile. Ganz ohne Kabelsalat. *Sonne, Wind & Wärme*, Jg. 33, Heft 16, S. 32–34.
- Kille, Chr. (2010):** Branchenspezifische Quantifizierung der Güteraufkommen in Deutschland. Verfahrensentwicklung, Ergebnisse und Diskussion als Beitrag zur Verbesserung der Transparenz der Märkte. Dissertation, Lohmar/Köln.
- Kille, Chr. (2018):** KEP-Märkte und Dienste. In: Gabler Verlag (Hg.): *Gabler Wirtschaftslexikon*. o.O., S. 263–267.
- Kille, Chr., Schwemmer, M. und Reichenauer, C. (2015):** TOP 100 in European Transport and Logistics Services, Hamburg.
- Kirchhoff, P. (2002):** Städtische Verkehrsplanung. Konzepte, Verfahren, Maßnahmen, Wiesbaden.
- Koether, R. (2012):** Distributionslogistik. Effiziente Absicherung der Lieferfähigkeit, Wiesbaden.
- Köhler, U. (2014):** Einführung in die Verkehrsplanung. Grundlagen, Modellbildung, Verkehrsprognose, Verkehrsnetze, Stuttgart.
- Kohlstock, P. (2011):** Topographie. Methoden und Modelle der Landesaufnahme. Berlin.
- Kohn, W. und Öztürk, R. (2017):** Statistik für Ökonomen. Datenanalyse mit R und SPSS. 3., überarbeitete Auflage, Berlin/Heidelberg.
- Koop, A. und Moock, H. (2018):** Lineare Optimierung - eine anwendungsorientierte Einführung in Operations Research, 2. Auflage, Berlin/Heidelberg.

- 
- Kopper, C., Hartwig, K.-H., Rothengatter, W., Gawel, E. und Eisenkopf, A. (2013):** Die Verkehrsinfrastruktur in Deutschland. Marode und unterfinanziert. Wirtschaftsdienst, Jg. 93, Heft 10, S. 659-677.
- Korzhenevych, A. (2012):** TRANS-TOOLS. An integrated support tool for European transport polic. Informationen zur Raumentwicklung, Heft 7/8, 349-356.
- Kraftfahrt-Bundesamt (2014):** Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD 3). Verkehrsverflechtungen. Jahr 2013, Flensburg.
- Kraftfahrt-Bundesamt (2015):** Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD 1). Verkehrsaufkommen. Jahr 2014, Flensburg.
- Kraftfahrt-Bundesamt (2017):** Fahrzeugzulassungen (FZ 13). Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen, Flensburg.
- Kraftfahrt-Bundesamt (2018):** Methodische Erläuterungen zu Statistiken über den Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD). Stand: November 2018, Flensburg.
- Krieger, W. (2018):** Stückgut. In: Gabler Verlag (Hg.): Gabler Wirtschaftslexikon. o.O.
- Krug, W. (2002):** Modelling, simulation and optimisation for manufacturing, organisational and logistical processes, Delft (Niederlande).
- Kühnel, S., Hacker, F. und Görz, W. (2018):** Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr. Ein Technologie- und Wirtschaftlichkeitsvergleich. Erster Teilbericht des Forschungsvorhabens „StratON – Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge“. Projektbereich, Berlin.
- Kummer, S., Grün, O. und Jammernegg, W. (2011):** Grundzüge der Beschaffung, Produktion und Logistik. 2., aktualisierte Auflage, Wien.
- Künne, H.D., Steierwald, G. und Vogt, W. (2005):** Planungsgrundlagen. In: Steierwald, G., Künne, H.D. und Vogt, W. (Hg.): Stadtverkehrsplanung, Berlin/Heidelberg, S. 3–18.
- Künne, T. (2019):** Eclipse. Kennenlernen, Verstehen, Effizient nutzen. München.
- Kurz, A., Stockhammer, C., Fuchs, S. und Meinhard, D. (2009):** Das problemzentrierte Interview. In: Buber, R. und Holzmüller, H.H. (Hg.): Qualitative Marktforschung: Konzepte, Methoden, Analysen. 2., überarbeitete Auflage, Wiesbaden, S. 463–477.
- Laguna, M. (2011):** OptQuest. Optimization of Complex Systems. Working Paper, o. O.
- Laguna, M. und Martí, R. (2003a):** Scatter search. Methodology and implementations in C. Reihe Operations Research/Computer Science Interfaces, Boston (USA).
- Laguna, M. und Martí, R. (2003b):** The OptQuest Callable Library. In: Voß, S. und Woodruff, D.L. (Hg.): Optimization Software Class Libraries. Reihe Operations Research/Computer Science Interfaces. Boston (USA), S. 193–218.
- Lambert, F. (2017):** Honda wants to charge electric vehicles dynamically for ‘unlimited range’ on highways. Onlineartikel. Electrek, 24.02.2017, URL: <https://electrek.co/2017/02/24/honda-electric-vehicles-dynamic-charging-unlimited-range/>. Letzter Zugriff am: 10.02.2019.
- Langhagen-Rohrbach, C. und Doepgen, P. (2020):** Politische Einordnung des Projekts. In: Boltze, M., Lehmann, M., Riegelhuth, G., Sommer, H. und Wauri, D. (Hg.): Elektrifizierung von Autobahnen für den Schwerverkehr: Umsetzung des Systems eHighway. Bisher unveröffentlichtes Sammelwerk, Bonn.
- Lee, S., Huh, J., Park, C., Choi, N.-S., Cho, G.-H. und Rim, C.-T. (2010):** On-Line Electric Vehicle using inductive power transfer system. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (Hg.): Energy Conversion Congress and Exposition 2010, Tagungsband, Atlanta (USA), S. 1598–1601.
-



- 
- Leihs, D., Siegl, T. und Hartmann, M. (2015):** City-Maut. Nutzen und Technologien von Systemen zum Steuern der Zufahrt in Zonen, Wiesbaden.
- Liedtke, G. und Friedrich, H. (2012):** Generation of logistics networks in freight transportation models. *Transportation*, Jg. 39, Heft 6, S. 1335–1351.
- Lindgren, L. (2015):** Full electrification of Lund city bus traffic. A simulation study. Dissertation. Department of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund Institute of Technology, Lund (Schweden).
- Lohse, D. und Schnabel, W. (2011):** Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung. Band 2: Verkehrsplanung. 3. Auflage, Berlin/Wien/Zürich.
- Lübbecke, M. (Hg.):** Zukunftsperspektiven des Operations Research: Erfolgreicher Einsatz und Potenziale. Festschrift zu Ehren von Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Hans-Jürgen Zimmermann. Wiesbaden.
- Manheim, M.L. (1976):** Transportation systems analysis. A personal view. *Transportation Research*, Jg. 10, Heft 6, S. 371–375.
- Manheim, M.L. (1980):** Fundamentals of transportation systems analysis. MIT Press series in transportation studies, Jg. 4, Cambridge (USA).
- Martí, R., Corberán, Á. und Peiró, J. (2015):** Scatter search for an uncapacitated p-hub median problem. *Computers & Operations Research*, Jg. 58, S. 53–66.
- Martí, R., Corberán, Á. und Peiró, J. (2018):** Scatter Search. In: Martí, R., Pardalos, P.M. und Resende, M.G.C. (Hg.): *Handbook of Heuristics*. Cham (Schweiz), S. 717–740.
- Martí, R., Laguna, M. und Glover, F. (2006):** Principles of scatter search. *European Journal of Operational Research*, Jg. 169, Heft 2, S. 359–372.
- März, L. und Krug, W. (2011):** Kopplung von Simulation und Optimierung. In: März, L., Krug, W., Rose, O. und Weigert, G. (Hg.): *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik: Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen*. Berlin/Heidelberg, S. 41–45.
- Mattfeld, D.C. und Vahrenkamp, R. (2014):** Logistiknetzwerke. Modelle für Standortwahl und Tourenplanung. 2., aktualisierte und überarbeitete Auflage, Wiesbaden.
- McCormick, T., Oriolo, G. und Peis, B. (2014):** Netzwerkalgorithmen in der robusten Optimierung. In: Lübbecke, M. (Hg.): *Zukunftsperspektiven des Operations Research: Erfolgreicher Einsatz und Potenziale*. Festschrift zu Ehren von Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Hans-Jürgen Zimmermann. Wiesbaden, S. 237–248.
- Meyer, B. (2016):** Zur historischen Genese der Verkehrsträger. In: Schwedes, O., Canzler, W. und Knie, A. (Hg.): *Handbuch Verkehrspolitik*. 2. Auflage 2016, Wiesbaden, S. 77–95.
- Mühlencoert, T. (2012):** Kontraktlogistik-Management. Grundlagen, Beispiele, Checklisten. Wiesbaden.
- Mühlenkamp, H. (2015):** Wirtschaftlichkeit im öffentlichen Sektor. Wirtschaftlichkeitsvergleiche und Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen, Berlin.
- Müller, S. (2012):** Makroskopische Verkehrsmodellierung mit der Einflussgröße Telematik. Eine Methodenarbeit und Beispielumsetzung mit Cooperative Adaptive Cruise Control Systemen im Güterverkehr. Dissertation, Fakultät Verkehrs- und Maschinensysteme, Technische Universität Berlin, Berlin.
- Nationale Plattform Elektromobilität (2018):** Fortschrittsbericht 2018 - Markthochlaufphase. URL: [http://nationale-plattform-lektromobilitaet.de/fileadmin/user\\_upload/Redaktion/NPE\\_Fortschrittsbericht\\_2018\\_barrierefrei.pdf](http://nationale-plattform-lektromobilitaet.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/NPE_Fortschrittsbericht_2018_barrierefrei.pdf), Letzter Zugriff am: 15.04.2020.

- 
- Nehm, A. (2014):** Logistik-Standortstrukturen. Eine exploratorische Untersuchung der Lage und der Merkmale von Logistikstandorten und deren Struktur beeinflussende Faktoren. 1. Auflage, Hamburg.
- Ng, A. und Soo, K. (2018):** Data Science - was ist das eigentlich?! Algorithmen des maschinellen Lernens verständlich erklärt. Berlin/Heidelberg.
- Nicolai, B. (2014):** Weltbank kürt Deutschland zum Logistikweltmeister. Onlineartikel, Die Welt, 21.03.2014, URL: <https://www.welt.de/wirtschaft/article126047109/Weltbank-kuert-Deutschland-zum-Logistikweltmeister.html>. Letzter Zugriff am: 04.06.2018.
- Norris, J. und Escher, G. (2017):** Heavy Duty Vehicles Technology Potential and Cost Study. Final Report for the International Council on Clean Transportation (ICCT), o. O.
- o. A. (2005):** Core Database Development for the European Transport policy Information System (ETIS). D9: Final technical report v1, o. O.
- o. A. (2012):** Bericht der Kommission "Zukunft der Verkehrsinfrastrukturfinanzierung". URL: [https://www.vifg.de/\\_downloads/service/Bericht-Daehre-Zukunft-VIF-Dez-2012.pdf](https://www.vifg.de/_downloads/service/Bericht-Daehre-Zukunft-VIF-Dez-2012.pdf). Letzter Zugriff am: 15.04.2020.
- o. A. (2017a):** PoliTo Charge While Driving. The innovative recharge system. Onlineartikel. Auto Design Magazine, 29.05.2017, o. S., URL: <http://autodesignmagazine.com/en/2017/05/polito-charge-while-driving-il-sistema-di-ricarica-innovativo>. Letzter Zugriff am: 23.02.2019.
- o. A. (2017b):** Alstom presents APS for road, its innovative electric road solution. Raillynews, 20.11.2017, URL: <http://www.raillynews.com/2017/alstom-presents-aps-road-innovative-electric-road-solution>. Letzter Zugriff am: 05.02.2019.
- o.A. (2017c):** Bombardier's PRIMOVE E-Bus Fleet in Braunschweig Proves the Power of E-Mobility. Pressemitteilung. Bombardier, 15.12.2017, URL: <https://www.bombardier.com/en/media/newsList/details.bt-20171215-bombardiars-primove-e-bus-fleet-in-braunschweig-prov.bombardiercom.html>. Letzter Zugriff am: 26.04.2020.
- o. A. (2018a):** China's Built a Road So Smart It Will Be Able to Charge Your Car. Bloomberg Hyperdrive, 11.04.2018, URL: <https://www.bloomberg.com/news/features/2018-04-11/the-solar-highway-that-can-recharge-electric-cars-on-the-move>. Letzter Zugriff am: 08.02.2019.
- o. A. (2018b):** Bundesinformationssystem Straße (BISStra). URL: [https://www.bast.de/BAST\\_2017/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-bisstra.html](https://www.bast.de/BAST_2017/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-bisstra.html). Letzter Zugriff am: 06.05.2019.
- o. A. (2019a):** Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge. Bedeutung für die Elektromobilität. URL: <https://www.vde.com/resource/blob/1875246/3a4ac5081799af17650c62316c183eb4/studie-brennstoffzelle-data.pdf>. Letzter Zugriff am: 15.04.2020. Studie des VDI/VDE. Düsseldorf.
- o. A. (2019b):** Elonroad. How it works. URL: <http://elonroad.com/info/>. Letzter Zugriff am: 19.02.2019.
- o. A. (2019c):** Elways solution. URL: <http://elways.se/elways-solution/?lang=en>. Letzter Zugriff am: 05.02.2019.
- o. A. (2019d):** Technologiereifegrade. URL: [https://www.bast.de/DE/BAST/Forschung/Forschungsfoerderung/Unterlagen-Kostenbasis/Downloads/Technologiereifegrade.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.bast.de/DE/BAST/Forschung/Forschungsfoerderung/Unterlagen-Kostenbasis/Downloads/Technologiereifegrade.pdf?__blob=publicationFile&v=2). Letzter Zugriff am: 08.02.2019.
- o. A. (2019e):** Technology Readyness Level. URL: [http://www.tuvpt.de/fileadmin/downloads/TRL\\_NFST\\_PT-TUEV.pdf](http://www.tuvpt.de/fileadmin/downloads/TRL_NFST_PT-TUEV.pdf). Letzter Zugriff am: 08.02.2019.
-



- 
- o. A. (2019f):** The OpenMap Developer's Guide. URL: <http://openmap-java.org/docs/OpenMapDevGuide.pdf>. Letzter Zugriff am: 15.04.2020.
- o.A. (2019g):** StratON: Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge. Unveröffentlichte Präsentation. 3. O-Lkw-Vernetzungstreffen, Darmstadt.
- o.A. (2020a):** Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. URL: <https://gdz.bkg.bund.de/>. Letzter Zugriff am: 22.02.2020.
- o.A. (2020b):** PTV Validate Deutschland. Produktwebseite. URL: <https://www.ptvgroup.com/de/loesungen/produkte/ptv-karten-daten/verkehrsplanung/validate/>. Letzter Zugriff am: 20.02.2020.
- o.A. (2020c):** Autobahn.de. Über uns. Firmenwebseite. URL: <https://www.autobahn.de/>. Letzter Zugriff am: 26.04.2020.
- o.A. (2020d):** TramWave. Ground-level power supply system (no overhead lines). Produktwebseite. URL: [http://sts.hitachirail.com/sites/ansaldosts/files/downloads/whats\\_tramwave\\_-\\_ansaldo\\_sts\\_-\\_1.pdf](http://sts.hitachirail.com/sites/ansaldosts/files/downloads/whats_tramwave_-_ansaldo_sts_-_1.pdf). Letzter Zugriff am: 26.04.2020.
- Oechsle, R. (2013):** Java-Komponenten. Grundlagen, prototypische Realisierung und Beispiele für Komponentensysteme, München.
- Ohrt, C. (2008):** Tourenplanung im Straßengüterverkehr. Wiesbaden.
- Opitz, J. (2009):** Automatische Erzeugung und Optimierung von Taktfahrplänen in Schienenverkehrsnetzen, Wiesbaden.
- Ortuzar, J.d.D. und Willumsen, L.G. (2011):** Modelling Transport, 4. Auflage, Hoboken (USA).
- Page, B. (1991):** Diskrete Simulation. Eine Einführung mit Modula-2. Berlin/Heidelberg.
- Page, B., Kreutzer, W. und Gehlsen, B. (2005):** The Java simulation handbook. Simulating discrete event systems with UML and Java. Reihe Berichte aus der Informatik, Aachen.
- Panchal, C., Stegen, S. und Lu, J. (2018):** Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system. Engineering Science and Technology, an International Journal, Jg. 21, Heft 5, S. 922–937.
- Park, J.H. und Yong, H.J. (2017):** The Economics of Wireless Charging on the Road. In: Suh, N.P. und Cho, D.H. (Hg.): The On-line Electric Vehicle: Wireless Electric Ground Transportation Systems. Cham (Schweiz), S. 329–345.
- Pettersson, J., Lindgren, M., Berndtson, A., Viklund, V. und Andersson, M. (2017):** National roadmap for electric road systems, URL: [https://www.trafikverket.se/contentassets/4c00abedf6794077a1e2a443cde60349/national\\_roadmap\\_for\\_electric\\_road\\_systems\\_20171129\\_eng.pdf](https://www.trafikverket.se/contentassets/4c00abedf6794077a1e2a443cde60349/national_roadmap_for_electric_road_systems_20171129_eng.pdf), Borlänge (Schweden).
- Pfäfflin, F. (2017):** Umweltaspekte in den neuen "Richtlinien für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen" (RWS). Kolloquium Luftqualität an Straßen, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.
- Pfohl, H.-C. (2018):** Logistiksysteme. Betriebswirtschaftliche Grundlagen. 9., neu bearbeitete und aktualisierte Auflage, Berlin.
- Piendl, R., Liedtke, G. und Matteis, T. (2017):** A logit model for shipment size choice with latent classes – Empirical findings for Germany. Transportation Research Part A: Policy and Practice, Jg. 102, S. 188–201.
- Piendl, R., Matteis, T. und Liedtke, G. (2019):** A machine learning approach for the operationalization of latent classes in a discrete shipment size choice model. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Jg. 121, S. 149–161.
- Pirath, C. (1949):** Die Grundlagen der Verkehrswirtschaft, 2., erweiterte Auflage, Berlin/Heidelberg.

- 
- Pomberger, G. und Dobler, H. (2008):** Algorithmen und Datenstrukturen. Eine systematische Einführung in die Programmierung. München.
- Priese, L. und Wimmel, H. (2008):** Petri-Netze. 2. Auflage, Berlin/Heidelberg.
- PTV Group (2012):** Handbuch VISUM 12.5. Grundlagen, Berlin.
- PTV Group und TCI Röhling (2016):** Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan 2030, Karlsruhe et al.
- Quatember, A. (2014):** Datenqualität in Stichprobenerhebungen. Eine verständnisorientierte Einführung in Stichprobenverfahren und verwandte Themen. Statistik und ihre Anwendungen, Berlin.
- Rabe, M., Spiekermann, S. und Wenzel, S. (2008):** Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und Techniken. Berlin/Heidelberg.
- Ramm, F. und Topf, J. (2010):** OpenStreetMap. Die freie Weltkarte nutzen und mitgestalten, 3., überarbeitete und erweiterte Auflage, Berlin.
- Rausch, J. (2016):** Empfehlungen zur Umsetzung des Qualitätsmanagements im Straßen- und Verkehrswesen. Dissertation am Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik, Technische Universität Darmstadt, Schriftenreihe der Institute für Verkehrs, V35, Darmstadt.
- Reiche, S. (2018):** A Disaggregate Freight Transport Model for Germany, Wiesbaden.
- Richter, C. und Keuchel, S. (2012):** Modelling Mode Choice in Passenger Transport with Integrated Hierarchical Information Integration. Journal of Choice Modelling, Jg. 5, Heft 1, S. 1–21.
- Richter, T. (2016):** Planung von Autobahnen und Landstraßen, Wiesbaden.
- Ritter, E.-H. (Hg.) (2005):** Handwörterbuch der Raumordnung. Akademie für Raumforschung und Landesplanung, 4., neu bearbeitete Auflage, Hannover.
- Rodrigue, J.-P., Comtois, C. und Slack, B. (2017):** The geography of transport systems. 4. Auflage, London (Vereinigtes Königreich)/New York (USA).
- Rolko, K. und Friedrich, H. (2017):** Locations of Logistics Service Providers in Germany. The basis for a new freight transport generation model. Transportation Research Procedia, Jg. 25, S. 1061–1074.
- Ropohl, G. (2012):** Allgemeine Systemtheorie. Einführung in transdisziplinäres Denken. Berlin.
- Rühl, F. (2018):** Das Konzept des Transportmanagements zur Beeinflussung der Güterverkehrsnachfrage im Rahmen der kommunalen Verkehrsplanung. Dissertation. Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik, Technische Universität Darmstadt, Schriftenreihe des Instituts für Verkehr, V37, Darmstadt.
- Sack, D. (2016):** Mehrebenenregieren in der europäischen Verkehrspolitik. In: Schwedes, O., Canzler, W. und Knie, A. (Hg.): Handbuch Verkehrspolitik. 2. Auflage 2016, Wiesbaden, S. 189–210.
- Sadigh, A.N., Mokhtari, H., Iranpoor, M. und Ghomi, S.M.T.F. (2012):** Cardinality Constrained Portfolio Optimization Using a Hybrid Approach Based on Particle Swarm Optimization and Hopfield Neural Network. Advanced Science Letters, Jg. 17, Heft 1, S. 11–20.
- Scharpf, B. (2015):** Ein theoretisches Modell zur Lorenz-Kurve und zum Pareto-Prinzip, URL: <http://www.bertram-scharpf.de/books/bscharpf-lorenzpareto.pdf>. Letzter Zugriff am 22.02.2020. o.O.
- Schaub, H. (2007):** Simulation als Entscheidungshilfe: Systemisches Denken als Werkzeug zur Beherrschung von Komplexität. In: Strohschneider, S. (Hg.): Entscheiden in kritischen Situationen. 2. Auflage, Frankfurt am Main, S. 51–76.
- Schawel, C. (2011):** Top 100 Management Tools, Wiesbaden.
- Scheiner, J. (2003):** Bewertungsverfahren in der Verkehrsplanung. Arbeitspapiere des Fachgebiets Verkehrswesen und Verkehrsplanung, Jg. 9, Dortmund.
-

- 
- Schmid, S. (2005):** Externe Kosten des Verkehrs. Grenz- und Gesamtkosten durch Luftschadstoffe und Lärm in Deutschland.
- Schneeweiß, C. (1991):** Planung. Systemanalytische und entscheidungstheoretische Grundlagen. Berlin/Heidelberg.
- Scholl, A., Furmans, K., Kuhn, A. und Wenzel, S. (2008):** Modellierung logistischer Systeme. In: Arnold, D., Isermann, H., Kuhn, A., Tempelmeier, H. und Furmans, K. (Hg.): Handbuch Logistik. Berlin/Heidelberg, S. 35–95.
- Scholles, F. (2005):** Bewertungs- und Entscheidungsmethoden. In: Ritter, E.-H. (Hg.): Handwörterbuch der Raumordnung. Akademie für Raumforschung und Landesplanung, 4., neu bearbeitete Auflage, Hannover, S. 97–106.
- Scholles, F. (2008):** Bewertungsmethoden. In: Fürst, D. und Scholles, F. (Hg.): Handbuch Theorien und Methoden der Raum- und Umweltplanung. 3., vollständig überarbeitete Auflage, S. 516–532.
- Scholles, F., Kanning, H. und Putschky, M. (2008):** Analysemethoden, Prognosemethoden, Bewertungsmethoden sowie Strukturierungs- und Kreativitätsmethoden. In: Fürst, D. und Scholles, F. (Hg.): Handbuch Theorien und Methoden der Raum- und Umweltplanung. 3., vollständig überarbeitete Auflage, S. 317–569.
- Scholz-Reiter, B., Toonen, C. und Windt, K. (2008):** Logistikdienstleistungen. In: Arnold, D., Isermann, H., Kuhn, A., Tempelmeier, H. und Furmans, K. (Hg.): Handbuch Logistik, Berlin/Heidelberg, S. 581–607.
- Schönharting, J. (2005):** Bewertungs- und Entscheidungshilfen. In: Steierwald, G., Künne, H.D. und Vogt, W. (Hg.): Stadtverkehrsplanung, Berlin/Heidelberg, S. 355–385.
- Schönharting, J. und Schuhmann, M. (2010a):** Die Entwicklung der Verkehrsplanung bis heute. Teil 1. Straßenverkehrstechnik, Heft 5, S. 296–303.
- Schönharting, J. und Schuhmann, M. (2010b):** Die Entwicklung der Verkehrsplanung bis heute. Teil 2. Straßenverkehrstechnik, Heft 6, S. 354–363.
- Schraven, S., Kley, F. und Wietschel, M. (2011a):** Induktives Laden von Elektromobilen. Eine techno-ökonomische Bewertung. Zeitschrift für Energiewirtschaft, Jg. 35, Heft 3, S. 209–219.
- Schraven, S., Kley, F. und Wietschel, M. (2011b):** Induktives Laden von Elektromobilen. Eine techno-ökonomische Bewertung. Zeitschrift für Energiewirtschaft, Jg. 35, Heft 3, S. 209–219.
- Schulte, J. und Ny, H. (2018):** Electric Road Systems. Strategic Stepping Stone on the Way towards Sustainable Freight Transport? Sustainability, Jg. 10, Heft 4, S. 1148.
- Schulz, G., Monse, J. und Haßheider, H. (2016):** Verkehrsinfrastruktur, Bundesverkehrswegeplan. In: Spang, K. (Hg.): Projektmanagement von Verkehrsinfrastrukturprojekten, Berlin/Heidelberg, S. 43–68.
- Schwarz-Geschka, M., Geschka, H. und Hahnenwald, H. (2016):** Die Szenariotechnik am Beispiel des Projektes "Zukunft der Mobilität". In: Göpfert, I. (Hg.): Logistik der Zukunft - Logistics for the Future. 7., aktualisierte und erweiterte Auflage, Wiesbaden, S. 363–386.
- Schwemmer, M. (2016):** TOP 100 der Logistik 2016/2017. Marktgrößen, Marktsegmente und Marktführer, Hamburg.
- Schwemmer, M., Kille, C. und Reichenauer, C. (2015):** "Less-than-truckload" networks, Stuttgart.
- Schwenkert, R. und Stry, Y. (2015):** Operations Research kompakt. Eine an Beispielen orientierte Einführung, 1. Auflage, Berlin/Heidelberg.
- SCI Verkehr (2018):** Logistikbarometer September 2018, Köln.
- Sebastian, H.-J. (2013):** Optimierung von Distributionsnetzwerken. Leipzig.

- 
- Sergienko, I.V., Hulianytskyi, L.F. und Sirenko, S.I. (2009):** Classification of applied methods of combinatorial optimization. *Cybernetics and Systems Analysis*, Jg. 45, Heft 5, S. 732–741.
- Sharma, M. (2018):** India Races Forward in Electric Cars. Online-Artikel. Bloomberg News, 22.12.2018, URL: <https://www.bloomberg.com/opinion/articles/2018-12-22/india-gets-policies-on-electric-car-infrastructure-right>. Letzter Zugriff am: 08.02.2019.
- Siemens AG (2012):** ENUBA: Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen. Schlussbericht der Siemens AG, o.O.
- Siemens AG, TU Dresden und DLR (2016):** ENUBA II: Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen. Projekt-Schlussbericht, o.O.
- Sjöstedt, L. (2000):** Logistics trends and their impact on European combined transport-services, traffic and industrial organisation. *Logistik-Management*, Jg. 5, Heft 2, S. 25–36.
- Sörensen, K. und Glover, F. (2013):** Metaheuristics. In: Gass, S.I. und Fu, M. (Hg.): *Encyclopedia of operations research and management science*. 3. Auflage, New York (USA).
- Sörensen, K., Sevaux, M. und Glover, F. (2018):** A History of Metaheuristics. In: Martí, R., Pardalos, P.M. und Resende, M.G.C. (Hg.): *Handbook of Heuristics*. Cham (Schweiz), S. 791–808.
- Speirs, J., Contestabile, M., Houari, Y. und Gross, R. (2014):** The future of lithium availability for electric vehicle batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 35, S. 183–193.
- Stachowiak, H. (1973):** Allgemeine Modelltheorie, Wien.
- Statistisches Bundesamt (2018):** Statistik für kleine und mittlere Unternehmen, Wiesbaden.
- Staud, J.L. (2006):** Geschäftsprozessanalyse. Ereignisgesteuerte Prozessketten und objektorientierte Geschäftsprozessmodellierung für Betriebswirtschaftliche Standardsoftware, 3. Auflage, Dordrecht.
- Stock, W. und Bernecker, T. (2014):** Verkehrsökonomie. Eine volkswirtschaftlich-empirische Einführung in die Verkehrswissenschaft. 2., vollständig überarbeitete Auflage 2014, Wiesbaden.
- Stoica, J. und Nybom, V. (2017):** High speed detecting and identification for car charging on electric roads. Masterarbeit, Lund University, Lund (Schweden).
- Stölzle, W. (2010):** Güterverkehr kompakt. Reihe Betriebswirtschaftslehre kompakt, München.
- Stüttgen, M. (2002):** Komplexe adaptive Systeme - oder: was wir von der Komplexitätstheorie für die Organisation von Unternehmen lernen können. In: Schwaninger, M. und Milling, P. (Hg.): *Entscheiden in komplexen Systemen. Wirtschafts kybernetik und Systemanalyse*. Berlin, S. 333–348.
- Suh, N.P., Cho, D.H. und Rim, C.T. (2011):** Design of On-Line Electric Vehicle (OLEV). In: Bernard, A. (Hg.): *Global Product Development: Proceedings of the 20th CIRP Design Conference*, Ecole Centrale de Nantes, Nantes (Frankreich), 19. bis 21.04. 2010, Berlin/Heidelberg, S. 3–8.
- Suh, N.P. und Cong, C.H. (2017a):** Making the Move: From Internal Combustion Engines to Wireless Electric Vehicles. In: Suh, N.P. und Cho, D.H. (Hg.): *The On-line Electric Vehicle: Wireless Electric Ground Transportation Systems*. Cham (Schweiz), S. 3–16.
- Suh, N.P. und Cong, C.H. (2017b):** Wireless Power Transfer for Electric Vehicles. In: Suh, N.P. und Cho, D.H. (Hg.): *The On-line Electric Vehicle: Wireless Electric Ground Transportation Systems*. Cham (Schweiz), S. 17–34.
- Suhl, L. und Mellouli, T. (2013):** Optimierungssysteme. Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen. 3., korrigierte und aktualisierte Auflage, Berlin.
- Tajima, T. (2018):** Development of Ultra-high Power and High Speed ER. (450 kW charge at 150 km/h). Präsentation, 2<sup>nd</sup> International Conference on Electric Road Systems, 13. und 14.06. 2018, Arlanda (Schweden).
-

- 
- Tajima, T., Noguchi, W. und Aruga, T. (2015):** Study of a Dynamic Charging System for Achievement of Unlimited Cruising Range in EV. SAE Technical Papers, Heft 2015-01-1686.
- Tajima, T., Tanaka, H., Fukuda, T., Nakasato, Y., Noguchi, W., Katsumasa, Y. und Aruga, T. (2018):** Study of High Power Dynamic Charging System. Präsentation, 2<sup>nd</sup> International Conference on Electric Road Systems (ERS), 13. und 14.06. 2018, Arlanda (Schweden).
- Tavasszy, L. und de Jong, G. (2013):** Introduction. In: Tavasszy, L. und de Jong, G. (Hg.): Modelling Freight Transport, Burlington (Vereinigtes Königreich), S. 1–12.
- Thomas, I., Hermia, J.-P., Vanelander, T. und Verhetsel, A. (2003):** Accessibility to freight transport networks in Belgium. A geographical approach. Tijdschrift voor Economische en Sociale Geografie, Jg. 94, Heft 4, S. 424–438.
- Thomas, M. (2001):** Die Vielfalt der Modelle in der Informatik. In: Keil-Slawik, R. (Hg.): Informatikunterricht und Medienbildung. 9. GI-Fachtagung Informatik und Schule, 17.- 20. September 2001, Paderborn, Beitrag imTagungsband, Bonn, S. 173–186.
- Töllner, A., Jungmann, T., Bücker, M. und Brutscheck, T. (2010):** Modelle und Modellierung. Terminologie, Funktionen und Nutzung. In: Bandow, G. und Holzmüller, H.H. (Hg.): "Das ist gar kein Modell!": Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften, Wiesbaden, S. 3-21.
- Treiber, M. und Kesting, A. (2010):** Verkehrsdynamik und -simulation. Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik. Berlin/Heidelberg.
- Ullenboom, C. (2019):** Java ist auch eine Insel. Einführung, Ausbildung, Praxis. 14., aktualisierte und überarbeitete Auflage, Bonn.
- Vahrenkamp, R. (2011):** Die logistische Revolution. Der Aufstieg der Logistik in der Massenkongsumgesellschaft. Beiträge zur Historischen Verkehrsforschung des Deutschen Museums, Jg. 12, Frankfurt am Main.
- Verband deutscher Ingenieure (2018):** Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Begriffe. VDI Richtlinie 3633. Düsseldorf.
- Veres-Homm, U., Kübler, A., Weber, N. und Cäsar, E. (2015):** Logistikimmobilien - Markt und Standorte 2015. 4., aktualisierte Auflage, Stuttgart.
- Viktoria Swedish ICT (2014a):** Slide-in Electric Road System. Project report, Phase 1. Conductive project report, Södertälje (Schweden).
- Viktoria Swedish ICT (2014b):** Slide-in Electric Road System. Project report, Phase 1. Inductive project report, Södertälje (Schweden).
- Vogt, W. (2005):** Prognosen und Szenarien. In: Steierwald, G., Künne, H.D. und Vogt, W. (Hg.): Stadtverkehrsplanung. Berlin/Heidelberg, S. 227–243.
- Vrtic, M. (2003):** Simultanes Routen- und Verkehrsmittelwahlmodell. Dissertation an der Technischen Universität Dresden, Dresden.
- Wartmann, R. (1961):** Trendextrapolation bei Zeitreihen. Metrika, Jg. 4, Heft 1, S. 237–246.
- Wegener, I. (2003):** Komplexitätstheorie. Grenzen der Effizienz von Algorithmen. Berlin/Heidelberg.
- Weicker, K. (2007):** Evolutionäre Algorithmen. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden.
- Wermuth, M. (2005):** Modellvorstellungen zur Prognose. In: Steierwald, G., Künne, H.D. und Vogt, W. (Hg.): Stadtverkehrsplanung. Berlin/Heidelberg, S. 243–296.
- Wermuth, M. und Wirth, R. (2005):** Modelle und Strategien des Güterverkehrs. In: Steierwald, G., Künne, H.D. und Vogt, W. (Hg.): Stadtverkehrsplanung. Berlin/Heidelberg, S. 296–327.
- Werners, B. (2013):** Grundlagen des Operations Research. Mit Aufgaben und Lösungen. 3., überarbeitete Auflage 2013, Berlin/Heidelberg.



- 
- Weyer, J. und Roos, M. (2017):** Agentenbasierte Modellierung und Simulation. Zeitschrift für Technikfolgenabschätzung in Theorie und Praxis, Jg. 26, Heft 3, S. 11–16.
- Wieberneit, N. (2008):** Linienverkehrsplanung in expeditionellen Sammelgutnetzen. Dissertation an der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät, Universität Augsburg, Augsburg.
- Wieland, B. (2010):** Europäische Verkehrspolitik und der Wettbewerb im Eisenbahnwesen und im Straßengüterverkehr. Wirtschaftsdienst, Jg. 90, Heft S1, S. 43–50.
- Wieland, B. (2016):** Verkehrsinfrastruktur: Volkswirtschaftliche und ordnungspolitische Aspekte. In: Schwedes, O., Canzler, W. und Knie, A. (Hg.): Handbuch Verkehrspolitik, 2. Auflage 2016. Wiesbaden, S. 351–380.
- Wietschel, M., Gnann, T., Kühn, A. und Plötz, P. (2017):** Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw, Karlsruhe.
- Winkler, C. (2012):** Ein integriertes Verkehrsnachfrage- und Bewertungsmodell. Ansatz einer Synthese von Mikroökonomie und Verkehrsplanung, Dresden.
- Yoon, U. (2017):** Pickup and Rectifier. In: Suh, N.P. und Cho, D.H. (Hg.): The On-line Electric Vehicle: Wireless Electric Ground Transportation Systems, Cham (Schweiz), S. 171–185.
- Zadek, H. (2004):** Struktur des Logistik-Dienstleistungsmarktes. In: Baumgarten, H., Darkow, I.-L. und Zadek, H. (Hg.): Supply Chain Steuerung und Services: Logistik-Dienstleister managen globale Netzwerke. Best Practices. Berlin/Heidelberg, S. 15–28.
- Zetraeus, D. (2018):** ElonRoad. Autocharge. Everywhere! Präsentation im Rahmen der 2<sup>nd</sup> International Conference on Electric Road Systems (ERS), 13. und 14.06. 2018, Präsentationsfolien, Arlanda (Schweden).
- Zhang, T., Chaovalitwongse, W.A. und Zhang, Y. (2012):** Scatter search for the stochastic travel-time vehicle routing problem with simultaneous pick-ups and deliveries. Computers and Operations Research, Jg. 39, Heft 10, S. 2277–2290.
- Ziemann, S. (2018):** Untersuchung und Bewertung der Rohstoffverfügbarkeit für Elektromobilität. Potentieller Rohstoffbedarf für Lithium-Ionen-Batterien. Dissertation an der Technischen Universität Darmstadt. Schriftenreihe IWAR, Nr. 252, Darmstadt.
- Zimmermann, H.-J. (2008):** Operations Research. Methoden und Modelle für Wirtschaftsingenieure, Betriebswirte, Informatiker. 2., aktualisierte Auflage, Wiesbaden.
- Zubi, G., Dufo-López, R., Carvalho, M. und Pasaoglu, G. (2018):** The Lithium-Ion Battery. State of the art and future perspectives. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Jg. 89, S. 292–308.
-





## Anhang 1: Übersicht Bewertungskriterien

Krit.-Nr.	Ebene	Bewertungskriterien	Ausstattung nicht möglich	Ausstattung mit hohem Mehraufwand möglich	Ausstattung mit geringem Mehraufwand möglich	Ausstattung ohne Mehraufwand möglich
		Teilnutzwert	0	1	2	3
Planungsrechtliche Eigenschaften						
SA-1	SA	Raumordnungsverfahren	-	Negative Beurteilung	Positive Beurteilung mit Maßnahmen	Positive Beurteilung
SA-2	SA	Umweltverträglichkeitsprüfung	-	UVP notwendig	-	Keine UVP notwendig
SA-3	SA	Planfeststellungsverfahren	-	Planfeststellungsverfahren	Plangenehmigungsverfahren	Verzicht auf ein PFV
SA-4	SA	Bundesverkehrswegeplan	Ausbauvorhaben geplant	-	-	Keine Ausbauvorhaben geplant
SA-5	SA	Grundeigentum	-	Eigentümer der Fläche Privat	Eigentümer der Fläche Land	Eigentümer der Fläche Bund
Eigenschaften der Flächen- und Bodenbeschaffenheit						
SE-6	SE	Nähe zu besiedelten Gebieten*	50 m	100 m	200 m	>300 m
SE-7	SE	Wasserschutzgebiete*	0 m	10 m	20 m	>30 m
SE-8	SE	Naturschutzgebiete*	0 m	10 m	20 m	>30 m
SE-9	SE	Natura 2000* (FFH-Gebiete, Vogelschutzgebiete)	0 m	10 m	20 m	>30 m
SE-10	SE	Landschaftsschutzgebiete*	0 m	10 m	20 m	>30 m
SE-11	SE	Forstwirtschaftliche Gebiete*	0 m	10 m	20 m	>30 m
SE-12	SE	Kampfmittelbelastete Gebiete	-	Kampfmittelbelastung zu erwarten	-	Keine Kampfmittelbelastung zu erwarten
SA-13	SA	Bodenbeschaffenheit	-	Es liegt kein Bodengutachten vor	-	Es liegt ein Bodengutachten vor
SA-14	SA	Höhenprofil	-	-	Steigung	Flaches Gelände, Gefälle
Seitenraum-Eigenschaften						
SE-15	SE	Lärmschutzeinrichtungen	Lärmschutzeinrichtung liegt vor, kein ausreichender Abstand zum Fahrbahnrand, kann nicht versetzt werden	Lärmschutzeinrichtung liegt vor, kein ausreichender Abstand zum Fahrbahnrand, kann versetzt werden	Lärmschutzeinrichtung liegt vor, ausreichender Abstand zum Fahrbahnrand	Keine Lärmschutzeinrichtung vorhanden
SE-16	SE	Nothaltebuchten	-	-	Nothaltebucht vorhanden, Ausleger verlängern	Keine Nothaltebucht im Streckenelement
SE-17	SE	Fahrzeugrückhaltesysteme	Zusätzliche Fläche von 0,8 m nicht frei, keine Schutzeinrichtung vorhanden	Zusätzliche Fläche von 0,8 m frei, keine Schutzeinrichtung vorhanden	Zusätzliche Fläche von 0,8 m frei, Umrüstung der Schutzeinrichtung auf Typ H4b	Zusätzliche Fläche von 0,8 m frei, Schutzeinrichtung mit Typ H4b vorhanden
SE-18	SE	Knotenpunkttyp	Ein Knotenpunkt liegt im Streckenelement	-	-	Kein Knotenpunkt liegt im Streckenelement
SE-19	SE	Anschlussstellen-Typ	A3, A4, A5, A6, A7 und A8 und E3, E4 und E5 liegen im Streckenelement	-	A1, A2 oder E1, E2 liegen im Streckenelement	Keine Anschlussstelle im Streckenelement
SE-20	SE	Rastanlage	-	-	Rastanlage vorhanden	Keine Rastanlage vorhanden
SE-21	SE	Temporäre Seitenstreifenfreigabe	Temporäre Seitenstreifenfreigabe vorhanden	-	-	Temporäre Seitenstreifenfreigabe nicht vorhanden

Abbildung A1-0-1: Bewertungskriterien Teil 1  
(Quelle: eigene Darstellung).

**Legende:** SE: Streckenelement

SA: Streckenabschnitt

**Erläuterungen:** \* Minimale Distanz (Luftlinie)

Krit.-Nr.	Ebene	Bewertungskriterien	Ausstattung nicht möglich	Ausstattung mit hohem Mehraufwand möglich	Ausstattung mit geringem Mehraufwand möglich	Ausstattung ohne Mehraufwand möglich
		Teilnutzwert	0	1	2	3
Höhen- oder längsrelevante Eigenschaften						
SE-22	SE	Höhenrelevante Bauwerke	Lichte Höhe BW < 4,65 m	4,65 m ≤ Lichte Höhe BW ≥ 4,8 m	4,8 m ≤ Lichte Höhe BW ≥ 6 m	Kein Bauwerk im Streckenabschnitt oder Lichte Höhe BW > 6,00 m
SE-23	SE	Längsrelevante Bauwerke	Tunnel und/ oder Brückenbauwerk >50 m vorhanden	-	-	Kein Tunnel und/ oder Brückenbauwerk >50 m vorhanden
Eigenschaften im Hinblick auf das elektrische Schutzkonzept						
SA-24	SA	Energieversorgung	-	Entfernung zu Freileitungen/ Erdkabeln > 3000 m	500m >Entfernung zu Freileitungen/ Erdkabeln <3000 m	Entfernung zu Freileitungen/ Erdkabeln < 500 m
SE-25	SE	Elektrisches Schutzkonzept	-	Mindestabstände werden nicht eingehalten		Alle Mindestabstände werden eingehalten
SA-26	SA	Standorte für Unterwerke	Fläche kann nicht bereitgestellt werden	Fläche kann zu hohen Kosten ermöglicht werden	Fläche kann zu geringen Kosten ermöglicht werden	Fläche steht zur Verfügung
Bau- und Straßenbetriebliche Eigenschaften						
SA-27	SA	Baubetrieb	-	-	Alle anderen RQ	RQ 35,5 & 36
SA-28	SA	Sichtbarkeit der vorhandenen Beschilderung	-	-	Verdeckungswahrscheinlichkeit hoch, da Rechtskurve oder Dammlage	Verdeckungswahrscheinlichkeit gering, da Gerade/ Linkskurve oder Einschnitt/ Ebene
SE-29	SE	Schwer-/ Großraumtransporte	Lichtraumprofil bis 4,5 m eingeschränkt	-	-	Lichtraumprofil bis 4,5 m uneingeschränkt

**Legende:** SE: Streckenelement

SA: Streckenabschnitt

**Erläuterungen:** \* Minimale Distanz (Luftlinie)

Abbildung A1-0-2: Bewertungskriterien Teil 2  
(Quelle: eigene Darstellung).

## Anhang 2: Automatisierungsmöglichkeiten der Bewertung von Streckenelementen

Für jedes Vorhaben, das die vorgeschlagene Bewertungsmethode nutzen will, besteht grundsätzlich die Möglichkeit einer manuellen Wirkungsabschätzung und einer sich anschließenden Bewertung mittels des Punktwertsystems. Mit Blick auf die, auf Ebene der Streckenelemente einschlägigen Bewertungskriterien bzw. -stufen ist jedoch auffällig, dass diese überwiegend quantitativ erfassbar und somit auch prinzipiell mittels eines entsprechenden Algorithmus automatisiert bewertbar sind.

Bei der manuellen Anwendung eines Bewertungsverfahrens bestehen Ermessensspielräume hinsichtlich qualitativer Punktwertvergaben. Als Beispiel dienen hierfür sicherlich die je nach Bewertendem unterschiedlichen Ergebnisse hinsichtlich des Kriteriums „Einschränkung des Landschaftsbildes durch Oberleitungen“. Bei einer **automatisierten Wirkungsabschätzung und Bewertung** dürfen solche Ermessensspielräume jedoch nicht bestehen, da ein Algorithmus nur eindeutige Entscheidungen treffen kann. **Für jedes Kriterium**, das einer automatisierten Wirkungsabschätzung und Bewertung zugänglich gemacht werden soll, müssen daher **zwei Voraussetzungen** erfüllt sein.

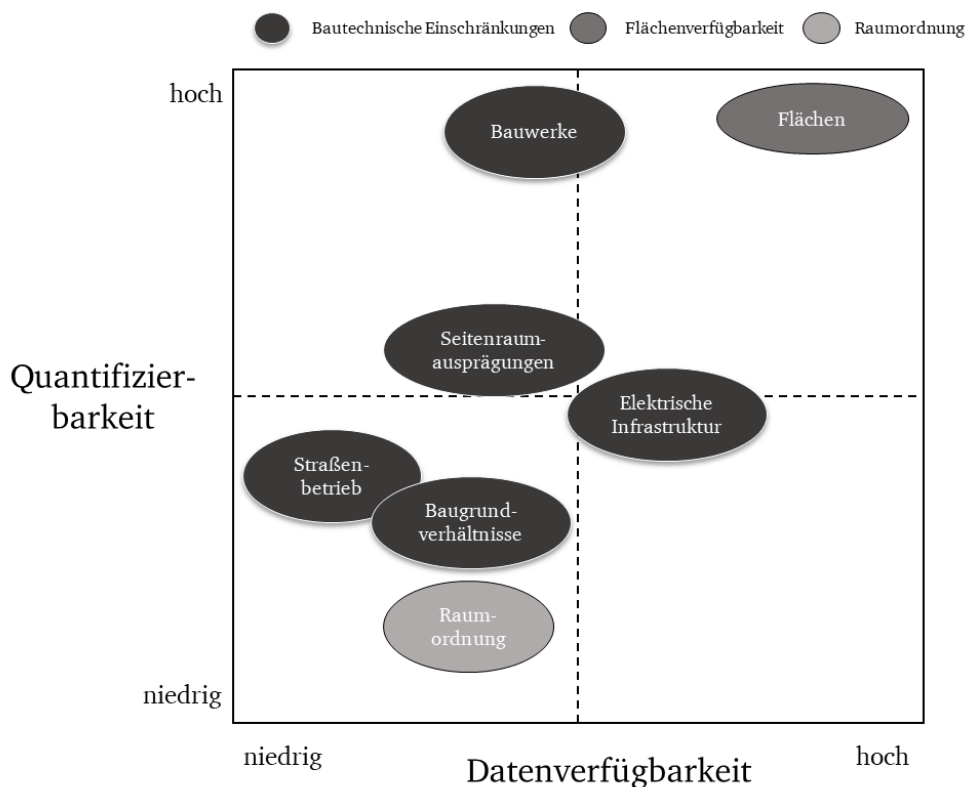


Abbildung A2-0-1: Bewertung der Kriterien in Bezug auf deren Quantifizierbarkeit sowie zur Datenverfügbarkeit (Quelle: eigene Darstellung).

Als erste Voraussetzung müssen die Bewertungsstufen eines Kriteriums **ausreichend quantifizierbar** sein. Im Falle des oben erwähnten Kriteriums *Einschränkung des Landschaftsbildes durch Oberleitungen* ist dies bspw. nur schwer möglich während hingegen Durchfahrtshöhen, Flächen im Seitenraum oder Abstände zu ökologisch sensiblen Gebieten quantitativ erfassbar und damit auch automatisiert bewertbar sind. Als zweite Voraussetzung muss für das betrachtete Kriterium eine **frei zugängliche bzw.**

---

**beschaffbare Datenquelle** verfügbar sein, damit ein automatisiertes Bewertungsverfahren anwendbar ist. So können bspw. Natur-, Landschafts-, Vogel- oder Wasserschutzgebiete in Form räumlicher Flächendaten leicht bezogen werden. Andere Datenquellen, z.B. zur räumlichen Lage der Beschilderung an der Fahrbahn, von Lärmschutzwänden oder Ähnlichem liegen entweder nicht vor oder können nur mit hohem finanziellem Aufwand beschafft werden. Eine **Einordnung** einiger Gruppen von Bewertungskriterien hinsichtlich deren **Datenverfügbarkeit** bzw. der **Quantifizierbarkeit** zeigt die untenstehende Abbildung.

Diejenigen **Bewertungskriterien**, bei denen sowohl eine **hohe Datenverfügbarkeit** als auch **eine hohe Quantifizierbarkeit** festgestellt werden konnte, wurden daher auch als erste Kriterien in ein Software-Tool zur automatisierten Wirkungsermittlung und Bewertung von Streckenelementen integriert. Dieses Tool kann bereits für zehn Kriterien eine automatisierte Bewertung des Ausstattungspotentials von Streckenelementen vornehmen. Über eine entsprechende Schnittstelle können Daten bzw. die Bewertungsergebnisse mit dem Verfahrensteil *Lageermittlung* auf Ebene der Streckenelemente ausgetauscht werden. Die technische Umsetzung in Software wird in Anhang 3 beschrieben.

Nr.	Bewertungskriterium (Streckenelemente)	Bewertungsgröße	Automatisierte Bewertung möglich?	Datenformat	Bezugsquelle (HE: Hessen, DE: Deutschland)
Einschränkungen aus Sicht der Planung und Genehmigung					
1	Grundeigentum	Grundbucheinträge	- -	Qualitative Beurteilung	ALKIS
2	Raumordnungsverfahren	Rechtsgutachten	- -	Qualitative Beurteilung	-
3	Planfeststellungsverfahren	Rechtsgutachten	- -	Qualitative Beurteilung	-
4	Umweltverträglichkeitsprüfung	Rechtsgutachten	- -	Qualitative Beurteilung	-
5	Bundesverkehrswegeplan	Neu- und Ausbauvorhaben, Lage	- -	Qualitative Beurteilung	Bundesverkehrswegeplan 2030
6	Nähe zu besiedelten Gebieten	Siedlungsflächen, Auswirkungen auf Mensch und Landschaftsbild	- -	Geodaten Qualitative Beurteilung	ATKIS (DLM250)
7	Nähe zu Wasserschutzgebieten	Wasserschutzgebiete, Schutzzonen	++	Geodaten	ATKIS (DLM250)
8	Nähe zu Naturschutzgebieten	Naturschutzgebiete	++	Geodaten	ATKIS (DLM250)
9	Nähe zu Natura 2000-Gebieten	FFH-Gebiete, Vogelschutzgebiete	++	Geodaten	ATKIS (DLM250)
10	Nähe zu Landschaftsschutzgebieten	Landschaftsschutzgebiete	++	Geodaten	ATKIS (DLM250)
11	Nähe zu forstwirtschaftlichen Gebieten	Waldgebiete	++	Geodaten	ATKIS (DLM250)
12	Kampfmittelbelastete Gebiete	Kampfmittelbelastete Gebiete	o	Qualitative Beurteilung	HE: (Regierungspräsidium, KMRD)
13	Mindestabstände aus dem elektrischen Schutzkonzept	Lage der Freileitungen, Lage elektr. Bahntrassen	o	Geodaten	ATKIS (DLM250)
Bautechnische Einschränkungen (Verfügbarkeit von Bauraum längs und über dem Straßenkörper)					
14	Autobahn-Typ	Seitenraumgestaltung, Regelquerschnitt, Entwurfsklasse	o	Geodaten	DE: BAST (BISStra) HE: Hessen Mobil
15	Lärmschutteinrichtungen	Lage, Typ, Abstand zum Fahrbahnrand	o	Geodaten	DE: BAST (BISStra) HE: Hessen Mobil
16	Nothaltebuchten	Lage, Länge, Breite	o	Geodaten	DE: BAST (BISStra) HE: Hessen Mobil
17	Fahrzeugrückhaltesysteme	Lage, Typ, Abstand zum Fahrbahnrand	o	Geodaten	DE: BAST (BISStra) HE: Hessen Mobil
18	Knotenpunkttyp	Lage, Typ	+	Geodaten	ATKIS (DLM1000, ohne Typen) DE: BAST (BISStra, mit Typen) HE: Hessen Mobil
19	Anschlussstellen	Lage, Typ	+	Geodaten	ATKIS (DLM1000, ohne Typen) BAST (BISStra, mit Typen) HE: Hessen Mobil
20	Rastanlagen / Parkplätze	Lage, Typ	++	Geodaten	ATKIS (DLM250) BAST (BISStra, mit Typen) HE: Hessen Mobil
21	Temporäre Seitenstreifenfreigabe	Lage, Länge	o	Geodaten	DE: BAST (BISStra) HE: Hessen Mobil
22	Höhenrelevante Bauwerke	Lage, Typ, Höhe		Geodaten	DE: BAST (BISStra) HE: Hessen Mobil
23	Andere längsrelevante Bauwerke	Lage, Typ, Länge		Geodaten	DE: BAST (BISStra) HE: Hessen Mobil
24	Energieversorgung	Lage der Freileitungen und Erdkabel		Geodaten	Freileitungen: ATKIS (DLM250) Erdkabel: DE: BAST HE: Hessen Mobil
25	Standorte für Unterwerke	Lage der Freileitungen und Erdkabel, Flächenverfügbarkeit		Qualitative Beurteilung , Geodaten	Freileitungen: ATKIS (DLM250) Erdkabel: DE: BAST HE: Hessen Mobil Flächenverfügbarkeit: ATKIS (Kriterium Flächenverfügbarkeit)
26	Überprüfung der Baugrundverhältnisse	Bodengutachten		Qualitative Beurteilung	DE: BAST (BISStra) HE: Hessen Mobil
27	Höhenprofil der Trasse	Steigung / Gefälle		Geodaten	ATKIS (DGM)
Straßenbetriebliche Einschränkungen					
28	Baubetrieb	Regelquerschnitt		Qualitative Beurteilung, Geodaten	DE: BAST (BISStra) HE: Hessen Mobil
29	Sichtbarkeit der vorhandenen Beschilderung	Seitenraumausprägung, Straßenverlauf		Geodaten	DE: BAST (BISStra) HE: Hessen Mobil
30	Schwer- / Großraumtransporte	Bauwerke: Lage, Typ, Höhe		Geodaten	DE: BAST (BISStra) HE: Hessen Mobil

Abbildung A2-0-2: Bewertung der Automatisierungspotentiale von Kriterien  
(Quelle: eigene Darstellung).



---

## Anhang 3: Technische Umsetzung

---

In diesem Abschnitt wird die technische Umsetzung des in Kapitel 5 beschriebenen Verfahrens in eine eigenständige Software (Java-Applet) beschrieben. Dazu wird zunächst die Wahl der Simulations- bzw. Entwicklungsumgebung begründet um dann auf die beiden wesentlichen Module des Verfahrens aus einer implementierungsorientierten Perspektive einzugehen. Die beiden hier vorgestellten Softwaremodule liegen sowohl als ausführbare Applets wie auch als Codedokumentation der Dissertationsschrift als Anlage bei.

### Entwicklungsumgebung

Zur **Implementierung** der Verfahrensteile *Infrastrukturbewertung* und *Lageermittlung* in ausführbare **Software** wurde die Simulationsumgebung *AnyLogic* verwendet (Grigoryev 2016; Borshchev 2013). Diese Simulationsumgebung beruht auf der weit verbreiteten und wegen ihrer Flexibilität auch beliebten Programmiersprache **Java** (Ullenboom 2019). Die Möglichkeit zur **Durchführung von Experimenten** basierend auf den **drei Simulationsparadigmen** *Agentensimulation*, *System Dynamics* sowie *zeit- bzw. ereignisdiskrete Simulation* vereint *AnyLogic* in einer einzigen Simulationsumgebung. Auch eine beliebige **Kombination** der **Simulationsparadigmen** ist möglich.

Wegen der gestalterischen Anlehnung an die Entwicklungsumgebung *Eclipse* ist *AnyLogic* auch als **Entwicklungsumgebung** verwendbar (Künne 2019). An jeder Stelle im Programmablauf können neben den vorab **herstellerseitig definierten Modellelementen** wie Zustandsdiagrammen, Prozessketten oder Entscheidungsbäumen, die durch den Benutzer per „drag and drop“ dem Modell hinzugefügt werden können, auch immer **eigene Bibliotheken, Klassen und Methoden** definiert und **freier Code** programmiert bzw. integriert werden kann. Gegenüber der manuellen Programmierung aller Teile der Software (mittels einer Entwicklungsumgebung) weist *AnyLogic* eine **Reihe weiterer Vorteile** auf. Dies wirkt sich lediglich auf die notwendige Zeit zur Fertigstellung und Prüfung des Modells aus, jedoch nicht auf die Qualität der Modellergebnisse.

Zum ersten ermöglicht *AnyLogic* die komfortable und einfache **Definition von Schnittstellen zu verschiedenen Arten von Datenbanken**. Dadurch können bedarfsgerechte Daten-Transaktionen (z.B. Abfragen, Aktualisierungen, Anlegen von Tabellen etc.) mit der weit verbreiteten Datenbanksprache SQL programmiert werden (im Allgemeinen steht SQL für *Structured Query Language*). Dies wirkt sich zum Beispiel auf den Import von Eingangsdaten bzw. den Export der Modellergebnisse in Tabellenkalkulationsprogramme oder Datenbanken positiv in Form geringerer Rechenzeiten aus. Daneben können Modellelemente automatisiert mit Parameter- und Variablenwerten versehen werden.

Zum zweiten enthält *AnyLogic* Komponenten zur **Erstellung von individuellen Benutzeroberflächen** (engl.: *graphical user interface*, kurz: GUI). und ermöglicht somit eine einfache Parametrisierung der unterschiedlichen Simulationsläufe, was mit *JavaFX* oder der veralteten *Swing*-Bibliothek zwar möglich gewesen wäre, allerdings deutlich mehr Zeit in Anspruch genommen hätte (Oechsle 2013). Zudem kann das zu implementierende Modell zur Laufzeit beobachtet und überwacht bzw. nach Abschluss eines Experiments mittels Benutzeroberfläche ausgewertet werden. Zudem erleichtert eine Benutzeroberfläche das Testen während der Modellentwicklung.

*AnyLogic* erlaubt zum dritten die Einbindung und Parametrisierung einer **georeferenzierten Karte** auf Basis der gemeinfreien *OpenMap*-Bibliothek (o. A. 2019f). Die Benutzung einer georeferenzierten Karte

---

ist eine Voraussetzung für eine räumlich exakt lokalisierbare Interaktion der Komponenten des Simulationsmodells. Die Notwendigkeit dazu ergibt sich unmittelbar aus den formulierten Anforderungen an die zu entwickelnde Lösungsmethode (siehe Abschnitt 5.1). Das Modul *Lageermittlung* ist durch die Einbindung einer georeferenzierten Karte zum Beispiel in der Lage, mit Komponenten der Systeme zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt ausgestattete Streckenabschnitte als Polygonzüge auf der Karte darzustellen, die aus dem Modul *Infrastrukturbewertung* importiert werden können (eine Umsetzung steht derzeit allerdings noch aus). Zudem erlaubt eine Kartendarstellung dem Anwender bereits eine erste optische Analyse und Plausibilitätsprüfung der unterschiedlichen Simulationsläufe.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die beiden in Software implementierten Module *Infrastrukturbewertung* bzw. *Lageermittlung* hinsichtlich einiger Software-Merkmale wie der Benutzeroberfläche, des Programmablaufs sowie der Ergebnisdarstellung näher beschrieben.

### Modul Infrastrukturbewertung

Der in Abschnitt 5.4 vorgestellte **Verfahrensteil Infrastrukturbewertung** soll, vorbehaltlich einer erfolgreichen Evaluation der drei deutschen *eHighway*-Feldversuche, auch für **zukünftige Planungsvorhaben** im Kontext des *eHighway* in Deutschland universell anwendbar sein. Außerdem soll auch eine **vergleichende Bewertung unterschiedlicher Systeme** zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt hinsichtlich ihrer Anforderungen an die Straßenverkehrsinfrastruktur möglich sein. Überdies steht hinsichtlich der Mehrzahl der Bewertungskriterien, die auf Ebene der Streckenelemente greifen, auch **grundsätzlich eine digitalisierte Datenbasis** zur Verfügung, sodass prinzipiell eine automatisierte Ermittlung der je Kriterium zutreffenden Bewertungsstufen möglich wäre. Aus diesen Gründen wurde der **Verfahrensteil Infrastrukturbewertung** mit Hilfe von *AnyLogic* in das **prototypische Software-Modul BeTSIE** überführt.<sup>43</sup>

**BeTSIE** erlaubt in seiner **prototypischen Form** die **automatisierte Ermittlung und Bewertung** baulich-räumlicher Einschränkungen in Bezug auf die Ausstattungsfähigkeit von Streckenelementen mit Oberleitungen für eine **Teilstrecke der BAB A5** zwischen den Anschlussstellen Zeppelinheim und Weiterstadt. Schematisch ist der Aufbau des Software-Prototyps **BeTSIE** in Abbildung A3-0-1 dargestellt. Der Software-Prototyp **BeTSIE** steht in seiner derzeitigen Ausgestaltung als **eigenständig ausführbares Softwaremodul** zur Verfügung. Das Modul verfügt über eine grafische Benutzeroberfläche und kann daher durch den Anwender konfiguriert werden. So können neben den **Grenzwerten der einzelnen Bewertungsstufen** auch die **Gewichtungen der Kriterien** eingestellt werden. Zudem sollen in weiteren geplanten Versionen des Moduls auch der Entwurf von Varianten verschiedener Oberleitungs-Ladestationen entlang der Strecke und eine anschließende Bewertung dieser Varianten möglich werden.

---

<sup>43</sup> Das Akronym **BeTSIE** steht für **Bewertung von Teilstrecken und Streckenelementen zur Identifikation von Elektrifizierungspotentialen**.



---

## Programmablauf

Eine **automatisierte Wirkungsabschätzung und Bewertung** von Streckenelementen hinsichtlich ihres Elektrifizierungspotentials mit der Software BeTSIE läuft in **fünf Schritten** ab. Bei jedem Bewertungsvorhaben mittels BeTSIE können im **ersten Schritt** zunächst diejenigen **Bewertungskriterien** über eine **graphische Benutzeroberfläche** ausgewählt werden, die in die Bewertung einbezogen werden sollen (siehe Abbildung 0-2).

The screenshot shows the BeTSIE software interface. At the top, a red header contains the title 'BeTSIE: Bewertung von Teilstrecken und Streckenelementen zur Identifikation von Elektrifizierungspotentialen' and the logo of the 'Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik TU Darmstadt'. Below the header, the main area is titled 'Einstellungen vornehmen:'. It features two radio buttons for 'Kilometrierung steigt in Richtung...': 'Nord - Süd bzw. Süd-Nord' (selected) and 'West-Ost bzw. Ost-West'. Below these are two columns of input fields for 'Fahrtrichtung Norden' and 'Fahrtrichtung Süden', each containing 'Start-Latitude', 'Start-Longitude', 'End-Latitude', and 'End-Longitude'. At the bottom left, there are input fields for 'Kilometrierung (km)' with 'Startwert der Kilometrierung' (503.0) and 'Endwert der Kilometrierung' (516.0). On the bottom right, there is a section 'Weitere Einstellungen' with three buttons: 'Bewertung', 'Parameter', and 'Weiter'. A 'Disclaimer' button is located in the top right corner of the main area.

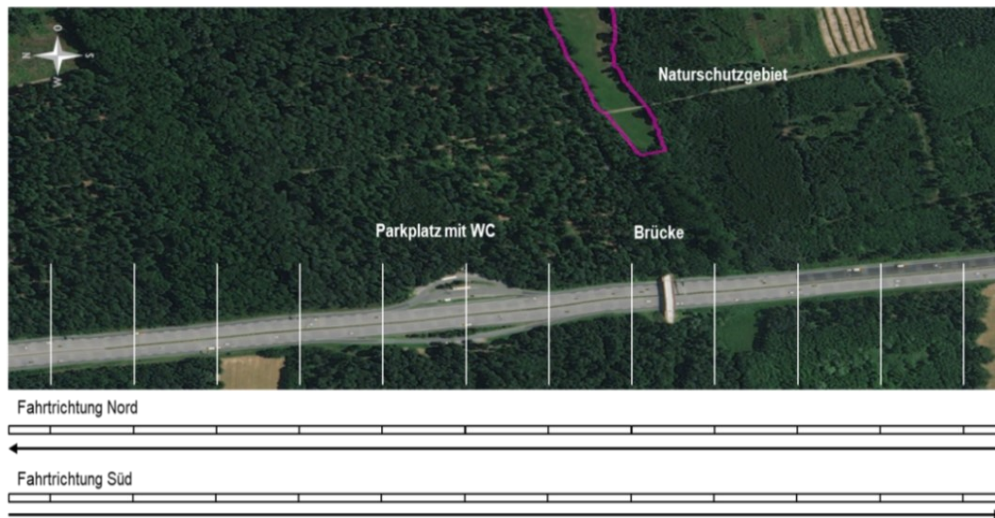
Abbildung A3-0-2: Benutzeroberfläche von BeTSIE  
(Quelle: eigene Darstellung).

In der Standard-Einstellung sind werden alle Bewertungskriterien berücksichtigt, Nutzer können jedoch auch einzelne Kriterien auswählen und bewerten lassen. Außerdem können die relativen Gewichtungen der Kriterien verändert werden. Darüber hinaus können auch die in den einzelnen Bewertungsstufen definierten Werte je Kriterium verändert sowie die Norm-Länge der Streckenelemente angepasst werden, um Sensitivitätsanalysen zu ermöglichen. Zudem sollen perspektivisch die beiden Anschlussstellen, die die zu bewertende Teilstrecke begrenzen, aus einer Liste aller Autobahn-Anschlussstellen ausgewählt werden können.

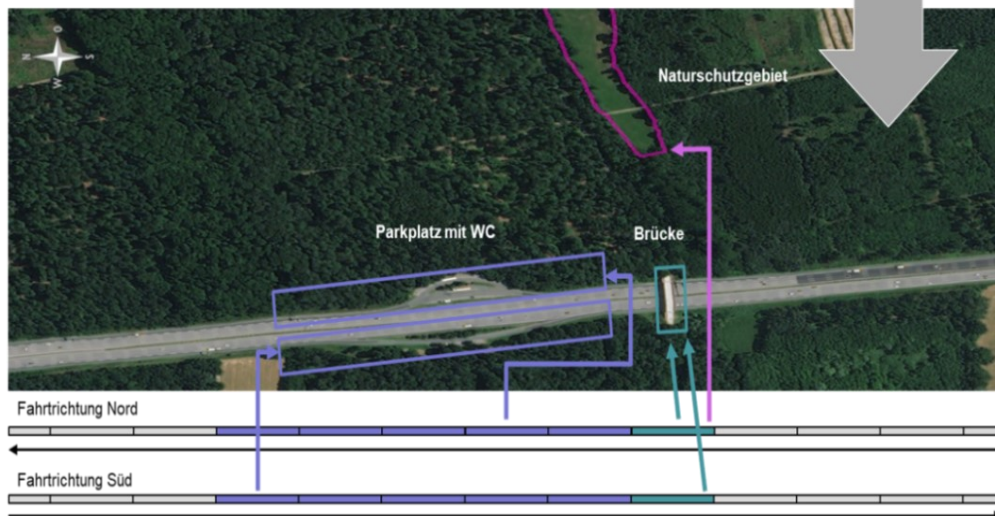
---



### Einteilung der Teilstrecke in Streckenelemente



### Ermittlung der Streckencharakteristika



### Bewertung auf Ebene der Streckenelemente

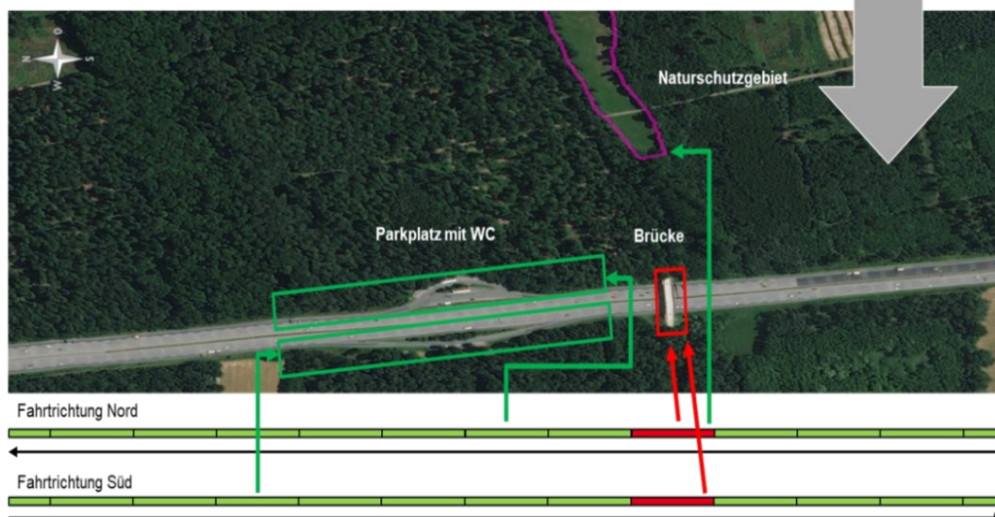


Abbildung A3-0-3: Illustration des BeTSIE-Programmablaufs  
(Quelle: eigene Darstellung).

---

Die **drei weiteren und wichtigsten Schritte** des Programmablaufs sind in Abbildung A3-0-3 als verständliches, fiktives aber realitätsnahes Beispiel illustriert worden. In diesem Beispiel eines Streckenabschnitts der BAB A5 sollen die drei Kriterien *Nähe zu Naturschutzgebieten* aus der Kategorie der *Rechtlichen Einschränkungen* sowie die Kriterien *Höhenrelevante Bauwerke* und *Rastanlagen/Parkplätze* aus der Kategorie *Bautechnische Einschränkungen* bewertet für das eHighway-System (Oberleitungen) bewertet werden. Während bei der *Nähe zu Naturschutzgebieten* die minimale Distanz (Luftlinie) in Metern im Rahmen der Wirkungsabschätzung gemessen wird, werden bei der Kategorie *Höhenrelevante Bauwerke* die maximal zulässigen Durchfahrtshöhen in Metern erfasst. Für das Kriterium *Rastanlagen/Parkplätze* der Anlage ergibt sich aus der Lage bzw. dem Typ, ob eine Ausstattung mit Oberleitungen aufgrund des zur Verfügung stehenden Seitenraums möglich wäre oder nicht.

Nach der Einstellung der Parameter durch den Nutzer generiert der BeTSIE-Algorithmus einem **zweiten Schritt** auf Basis der Nutzereingaben je eine Teilstrecke pro Fahrtrichtung und teilt diese in **Streckenelemente** der vorab festgelegten **Norm-Länge** ein. Dies ist im oberen der drei Teile der Abbildung A3-0-3 veranschaulicht worden. In diesem Beispiel wird ein Streckenabschnitt betrachtet, dessen Streckenelemente einen Parkplatz mit WC (PWC) und eine Brücke enthalten. Zudem befindet sich ein Naturschutzgebiet in der Nähe der Teilstrecken.

In einem **dritten Schritt** erfolgt nun die **Ermittlung der Streckencharakteristika**, d.h. die Wirkungsermittlung im Sinne des Verkehrsplanungsprozesses. Bezogen auf das konkrete Beispiel ist dies im mittleren Teil der Abbildung A3-0-3 dargestellt. Der BeTSIE-Algorithmus detektiert hier also die Brücke, den PWC sowie das Naturschutzgebiet. Während der minimale Abstand zum Naturschutzgebiet sowie die Lage der Brücke innerhalb eines einzigen Streckenelements in Fahrtrichtung Norden erkannt worden sind, befindet sich das korrespondierende Streckenelement in Fahrtrichtung Süden nicht mehr innerhalb des Suchradius, allerdings wurde die Brücke innerhalb des Streckenelements gefunden. Der PWC liegt in beiden Fahrtrichtungen jeweils in fünf Streckenelementen und wurde ebenfalls erkannt.

Im **vierten Schritt** erfolgt nun die eigentliche **Bewertung**, indem die erkannten Ausprägungen der Streckencharakteristika und die hinsichtlich der Kriterien definierten Bewertungsstufen verglichen werden. Im unteren Teil der Abbildung A3-0-3 zeigt sich so zum Beispiel, dass die beiden Streckenelemente, die die Brücke enthalten (eines je Fahrtrichtung), auf Grund des vertikal nicht zur Verfügung stehenden Bauraums auch nicht mit Oberleitungen ausgestattet werden können. Daher vergibt der BeTSIE-Algorithmus in diesem Fall den Punktwert 0. In diesem Fall ist es nun auch unerheblich, dass das Naturschutzgebiet nicht innerhalb der definierten Abstände liegt. Eine Ausstattung des PWC aufgrund seiner baulichen Gestaltung ist aber möglich. Für diesen Streckenabschnitt ergibt sich also, dass eine eHighway-Strecke vor der Brücke unterbrochen werden müsste um danach wieder fortgesetzt werden zu können.

Im **fünften und letzten Schritt** können die **Bewertungsergebnisse** in gängige Ausgabe-Dateiformate umgewandelt und **exportiert** werden. Zusätzlich erfolgt eine **Visualisierung der Ergebnisse** wie im unteren Teil der Abbildung A3-0-3 dargestellt. Dabei bedeutet eine **grüne Einfärbung** eine auf Basis des jeweiligen Kriteriums uneingeschränkt mögliche Ausstattung des Streckenelements, wohingegen eine **rote Einfärbung** bedeutet, dass eine Elektrifizierung grundsätzlich nicht möglich ist. Dazwischen werden **eine oder mehrere Gelbstufen** eingeführt, die einen kleinen, mittleren oder hohen Mehraufwand gegenüber einer einschränkungsfreien Elektrifizierung erwarten lassen. Die farbliche

---



Hervorhebung der Bewertungsergebnisse gewährleistet bereits eine erste optische Orientierung, wie mögliche Varianten innerhalb der Teilstrecke geplant und ausgeführt werden könnten.

## Datengrundlage

Als **Datenbasis für BeTSIE** dient eine Vielzahl öffentlich zugänglicher Datenquellen. Eine Übersicht aller Kriterien, die grundsätzlich automatisch bewertbar sind (und damit nur eine Teilmenge aller Bewertungskriterien) enthält Abbildung A3-0-4.

Nr.	Bewertungskriterium (Streckenelemente)	Bewertungsgröße	Datenformat	Bezugsquelle (Deutschland)
Rechtliche Einschränkungen				
7	Nähe zu Wasserschutzgebieten	Wasserschutzgebiete, Schutzzonen	Geodaten	ATKIS (DLM250)
8	Nähe zu Naturschutzgebieten	Naturschutzgebiete	Geodaten	ATKIS (DLM250)
9	Nähe zu Natura 2000-Gebieten	FFH-Gebiete, Vogelschutzgebiete	Geodaten	ATKIS (DLM250)
10	Nähe zu Landschaftsschutzgebieten	Landschaftsschutzgebiete	Geodaten	ATKIS (DLM250)
11	Nähe zu forstwirtschaftlichen Gebieten	Waldgebiete	Geodaten	ATKIS (DLM250)
13	Mindestabstände aus dem elektrischen Schutzkonzept	Lage der Freileitungen, Lage elektr. Bahntrassen	Geodaten	ATKIS (DLM250)
Bautechnische Einschränkungen (Verfügbarkeit von Bauraum längs und über dem Straßenkörper)				
14	Autobahn-Typ	Seitenraumgestaltung, Regelquerschnitt, Entwurfsklasse	Geodaten	BASSt (BISStra)
15	Lärmschutteinrichtungen	Lage, Typ, Abstand zum Fahrbahnrand	Geodaten	BASSt (BISStra)
16	Nothaltebuchten	Lage, Länge, Breite	Geodaten	BASSt (BISStra)
17	Fahrzeugrückhaltesysteme	Lage, Typ, Abstand zum Fahrbahnrand	Geodaten	BASSt (BISStra)
18	Knotenpunkttyp	Lage, Typ	Geodaten	ATKIS (DLM1000, ohne Typen) BASSt (BISStra, mit Typen)
19	Anschlussstellen	Lage, Typ	Geodaten	ATKIS (DLM1000, ohne Typen) BASSt (BISStra, mit Typen)
20	Rastanlagen / Parkplätze	Lage, Typ	Geodaten	ATKIS (DLM250) BASSt (BISStra, mit Typen)
21	Temporäre Seitenstreifenfreigabe	Lage, Länge	Geodaten	BASSt (BISStra)
22	Höhenrelevante Bauwerke	Lage, Typ, Höhe	Geodaten	BASSt (BISStra)
23	Andere längsrelevante Bauwerke	Lage, Typ, Länge	Geodaten	BASSt (BISStra)
24	Energieversorgung	Lage der Freileitungen und Erdkabel	Geodaten	Freileitungen: ATKIS (DLM250) Erdkabel: BASSt
25	Standorte für Unterwerke	Lage der Freileitungen und Erdkabel, Flächenverfügbarkeit	Qualitative Beurteilung , Geodaten	Freileitungen: ATKIS (DLM250) Erdkabel: BASSt Flächenverfügbarkeit: ATKIS (Kriterium Flächenverfügbarkeit)
26	Überprüfung der Baugrundverhältnisse	Bodengutachten	Qualitative Beurteilung	BASSt (BISStra)
27	Höhenprofil der Trasse	Steigung / Gefälle	Geodaten	ATKIS (Dig. Geländemodell)

Abbildung A3-0-4: Übersicht der automatisiert bewertbaren Kriterien sowie deren Datenquellen  
(Quelle: eigene Darstellung).

Zum ersten ist hier das **Digitale Landschaftsmodell DLM 250** (Maßstab: 1:250.000) bzw. DLM 1000 (Maßstab: 1:1.000. 000) des *Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie* zu nennen, das gemeinfrei zur Verfügung steht (Kohlstock 2011). Das DLM ist einer von mehreren Bestandteilen des Amtlichen

---

Topographisch-Kartographischen Informationssystems (ATKIS) und basiert auf einem gemeinsamen Datenmodell der Vermessungsverwaltungen des Bundes und der Länder. Die topographischen Objekte der Landschaft werden im DLM als Vektordaten im digitalen Landschaftsmodell einer bestimmten Objektart (z.B. Verkehrsbauwerke) zugeordnet und durch ihre räumliche Lage, ihren geometrischen Typ (z.B. Polygon) und beschreibende Attribute (z.B. Kennung) definiert. Welche Objektarten das jeweilige DLM beinhaltet, ist im ATKIS-Objektartenkatalog (ATKIS-OK) festgelegt. Aus den DLM konnten eine Vielzahl unterschiedlicher Gebietstypen, Flächennutzungen, Verkehrsanlagen oder Trassenverläufe von Bahn- und Stromtrassen entnommen werden.

Ein digitalisiertes **Verkehrsnetzmodell**, das dem Bundesverkehrswegeplan 2015 zugrunde liegt, konnte kommerziell bei der *Clearingstelle für Verkehr* beschafft werden (Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur, 2014). Dies enthält ca. 22.000 Polylinien der Bundesautobahnen, die mit Attributen wie Fahrstreifenanzahl oder Entwurfsklasse versehen sind. Zudem konnte für die Teilstrecke zwischen den Anschlussstellen Zeppelinheim und Weiterstadt der BAB A5 ein Auszug über **Verkehrsbauwerke inkl. der Beschilderung** aus der *Straßeninformationsbank Hessen (SIB-HE)* von Hessen Mobil bezogen werden (Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur).

---

---

## Modul Lageermittlung

Das **Modul Lageermittlung** bildet den in Abschnitt 5.6 beschriebenen **Verfahrensteil Lageermittlung** exakt in Software ab. Der Verfahrensteil wurde ebenfalls in *AnyLogic* implementiert und kann über eine **Datenschnittstelle** mit dem **Modul BeTSIE (Infrastrukturbewertung)** verbunden werden. Das Modul besteht aus einer **ereignis- und zeitdiskreten Simulation**, die durch eine **Optimierungskomponente** gesteuert wird. Wie das BeTSIE-Modul auch, wurde für das Modul Lageermittlung das Akronym **OAASEE** gewählt, was für *Optimierung der Ausstattung von Autobahnen mit Systemen zur elektrischen Energieversorgung* steht.

*AnyLogic* wurde hier verwendet, weil die Simulationsumgebung mit **OptQuest** als **Optimierungskomponente** operiert. *OptQuest* ist eine kommerzielle Optimierungslösung, die **modellunabhängig** mit einer **beliebigen Simulationsumgebung gekoppelt** werden kann (Duarte *et al.* 2018a; Laguna und Martí 2003b). In *OptQuest* wird jede Simulation als Blackbox betrachtet, die aus einer Zielfunktion und zu erfüllenden Nebenbedingungen besteht, ohne dass weitere modell- bzw. problemspezifische Informationen benötigt werden. Daher ist *OptQuest* auch in anderen Simulationsumgebungen integriert (Fu 2002). Hinsichtlich der **Qualität** der mit *OptQuest* gefundenen **Lösungen** für das jeweilige Modell gilt *OptQuest* zuverlässigste Software für die simulationsbasierte Optimierung (Fu *et al.* 2005; Eskandari *et al.* 2011). *OptQuest* wird aus diesem Grund auch in der Wissenschaft häufig eingesetzt, insbesondere im Rahmen der simulationsbasierten Optimierung (Amaran *et al.* 2016).

*OptQuest* greift methodisch im Kern auf die in Abschnitt 3.1.4 beschriebene **Scatter Search** zurück, nutzt aber in Abhängigkeit der Struktur des jeweils zugrundeliegenden Problems auch exakte Verfahren bzw. weitere Heuristiken (Laguna 2011). Daneben sind Funktionen zur **Steuerung und Verbesserung** der Ergebnisse bzw. der **Beschleunigung der Laufzeit** beliebige Simulationsumgebungen enthalten. *OptQuest* fungiert damit im Rahmen der simulationsbasierten Optimierung als **zentrales Steuerungsinstrument** innerhalb der Modellarchitektur.

Zur Lösung **stochastischer Optimierungsmodelle** verwendet *OptQuest* mehrere Replikationen einer stochastischen Simulation mit identischen Wertbelegungen der Optimierungsvariablen, um anhand des Stichproben-Mittelwerts eine Bewertung der Lösung vorzunehmen (Deckert 2012). Der Algorithmus von *OptQuest* nutzt hierzu entweder eine vom Anwender vorgegebene, festgelegte Anzahl an Replikationen oder definierte Schranken für die Mindest- und Höchstanzahl der Replikationen. Zwischen diesen Schranken entscheidet führt der Algorithmus dann statistische Testverfahren durch und entscheidet auf dieser Basis, ob weitere Replikationen zur Bewertung der Lösung notwendig sind. Die akzeptable statistische Konfidenz kann dabei vom Anwender als Parameter vorgegeben werden (Laguna 2011).

## Programmablauf

Ein **Simulationsexperiment** mit Hilfe des Software-Moduls **OAASEE** erfordert zunächst die Einstellung wichtiger Parameterwerte über eine graphische Benutzeroberfläche, die in Abbildung A3-0-5 dargestellt ist. Hier kann der Anwender zunächst das im Simulationslauf unterstellte Fahrzeug konfigurieren.

The screenshot shows the OAASEE software interface. The title bar is red with the text 'OAASEE' and 'Optimierung der Ausstattung deutscher Autobahnen mit Systemen zur elektrischen Energieversorgung'. The logo of the 'Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik TU Darmstadt' is in the top right corner. The main interface is divided into two sections: 'Lkw konfigurieren:' and 'Weitere Parameter festlegen:'. The 'Lkw konfigurieren:' section contains four sliders: 'Verbrauch Dieselmodus (l/km)' with values 0.243, 0.27, 0.45; 'Verbrauch Batteriemodus (kWh/km)' with values 1.1, 1.1, 3; 'Netto-Batteriekapazität (kWh)' with values 2, 75, 400; and 'Verbrauch Stationsmodus (kWh/km)' with values 1.2, 1.2, 3. The 'Weitere Parameter festlegen:' section contains several sliders and checkboxes. Sliders include 'Budget (Mio. EUR)' with values 100, 12,200, 45,000; 'Kostensatz CO2 (EUR/t)' with values 100, 150, 1,000; 'Kostensatz Diesel (EUR/l)' with values 100, 150, 1,000; and 'Kostensatz Fahrstrom (EUR/kWh)' with values 100, 150, 1,000. Checkboxes include 'max. Streckenlänge vorgeben' (unchecked), 'berücksichtigen' (checked), 'Diesel-Referenzfall' (unchecked), 'ja' (checked), 'vollst. Export der Ergebnisse' (checked), 'ja' (checked), 'Abarbeitungsreihenfolge vorgeben' (checked), 'ja' (checked), 'Netzkonfiguration vorgeben' (unchecked), and 'ja' (checked). A 'Starte Simulation' button is at the bottom right.

Abbildung A3-0-5: Grafische Benutzeroberfläche des OAASEE-Moduls  
(Quelle: eigene Darstellung).

Das Parametrisieren des unterstellten Referenzfahrzeugs umfasst z.B. das Definieren des **Kraftstoff-Verbrauchs** im Dieselmodus sowie des **Stromverbrauchs** im Stations- bzw. Batteriemodus. Daneben kann die **Netto-Kapazität** des **Energiespeichers** in Kilowattstunden festgelegt werden, wodurch auch unterschiedliche Hübe während des Ladens des Energiespeichers abgebildet werden können.

Außerdem können weitere **Parameter** festgelegt werden, die sich einerseits auf die **Betriebskosten** der Fahrzeuge beziehen. So kann das zur Verfügung stehende **Budget** zum **Ausbau** entlang des Autobahnnetzes eingestellt werden sowie der verbrauchte **Fahrstrom** sowie das **emittierte Kohlendioxid** definiert werden. Zudem kann der Anwender bestimmen, ob die **Ergebnisse** aus dem **Modul BeTSIE (Infrastrukturbewertung)** importiert werden sollen oder nicht. Außerdem können **Exportoptionen** bestimmt und die **Abarbeitungsreihenfolge der Relationen** festgelegt werden.

Nach der Einstellung aller wesentlichen Parameter kann der Anwender nun einen **Simulationslauf** mit OAASEE starten. Hierbei kann der Anwender entweder ein Simulations- oder ein Optimierungsexperiment (d.h. mehrere parallele Simulationsexperimente) durchführen. Für die Optimierung wurde keine eigene grafische Benutzeroberfläche entworfen, jedoch wurde zur **Visualisierung** der Simulationsexperimente die in Abbildung A3-0-6 dargestellte **Benutzeroberfläche** erstellt. Daraufhin werden zunächst einige **Hilfsfunktionen** ausgeführt, die die Simulationssteuerung vorbereiten bzw. das Datenmanagement zur Aufgabe haben.

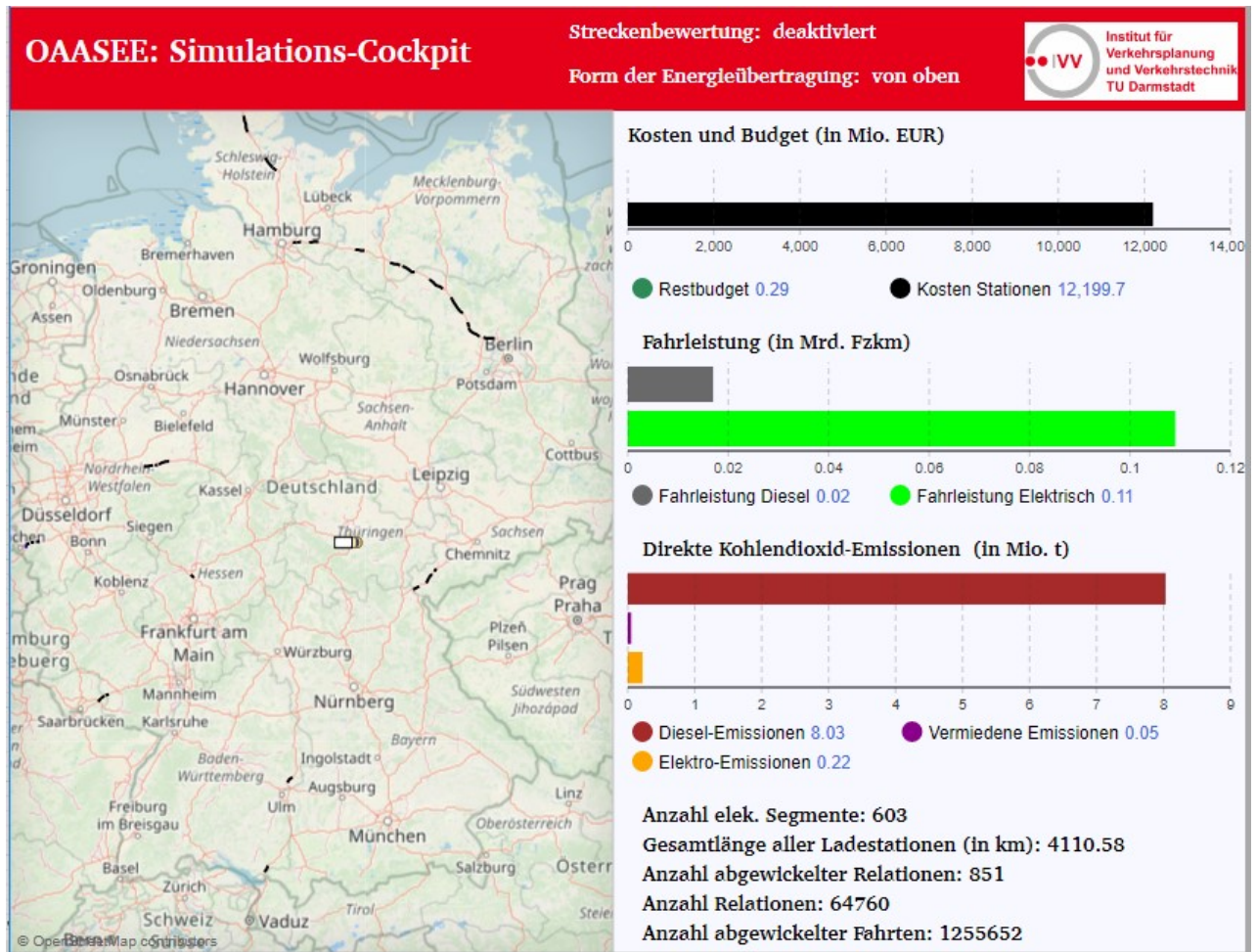


Abbildung A3-0-6: Simulations-Übersicht des OAASEE-Moduls  
(Quelle: eigene Darstellung).

Nach Initialisierung eines Simulationsexperiments werden alle Relationen nach festgelegten Regeln abgearbeitet indem die Fahrt eines Referenzfahrzeuges modellhaft abgebildet wird. Die aus einer Verkehrsverflechtungsmatrix eingelesenen **Quell-Ziel-Relationen auf Ebene der Netzeinspeiseknoten** werden durch eine einzelne, fiktive **Fahrt** unter Nutzung des Verkehrsnetzmodells dargestellt. Diese fiktive Fahrt wird aber mit dem Verkehrsaufkommen zwischen den beiden Netzeinspeiseknoten zu Zwecken der Auswertung gewichtet.



Die Abarbeitungsreihenfolge dieser Relationen aus der Relationsstichprobe kann in OAASEE nach drei Prinzipien erfolgen: zufällig, aufsteigend nach Fahrtengewicht oder absteigend nach Verkehrsaufkommen. Da jede Relation mit einem eindeutigen, ganzzahligen Identifikationsschlüssel versehen ist, bildet eine **Gleichverteilung** die Basis für eine **Zufallsziehung** dieser Identifikationsschlüssel. Somit hat jede Relation die gleiche Wahrscheinlichkeit, die nächste abzuarbeitende Relation zu sein. Über die Identifikationsschlüssel können bei Sortierung der Relationsstichprobe aber auch andere Ziehungsverfahren implementiert werden.

Der Anwender kann mit Hilfe der Benutzeroberfläche den Verlauf des Simulationsexperiments nachvollziehen, indem die Fahrzeugbewegung entlang des Autobahnnetzes auf einer eingebetteten Karte dargestellt wird. Das Kartenbild im Hintergrund wird im Wege einer gemeinfreien Lizenz vom Projekt *OpenStreetMap.org* bezogen und eingebettet (Ramm und Topf 2010).

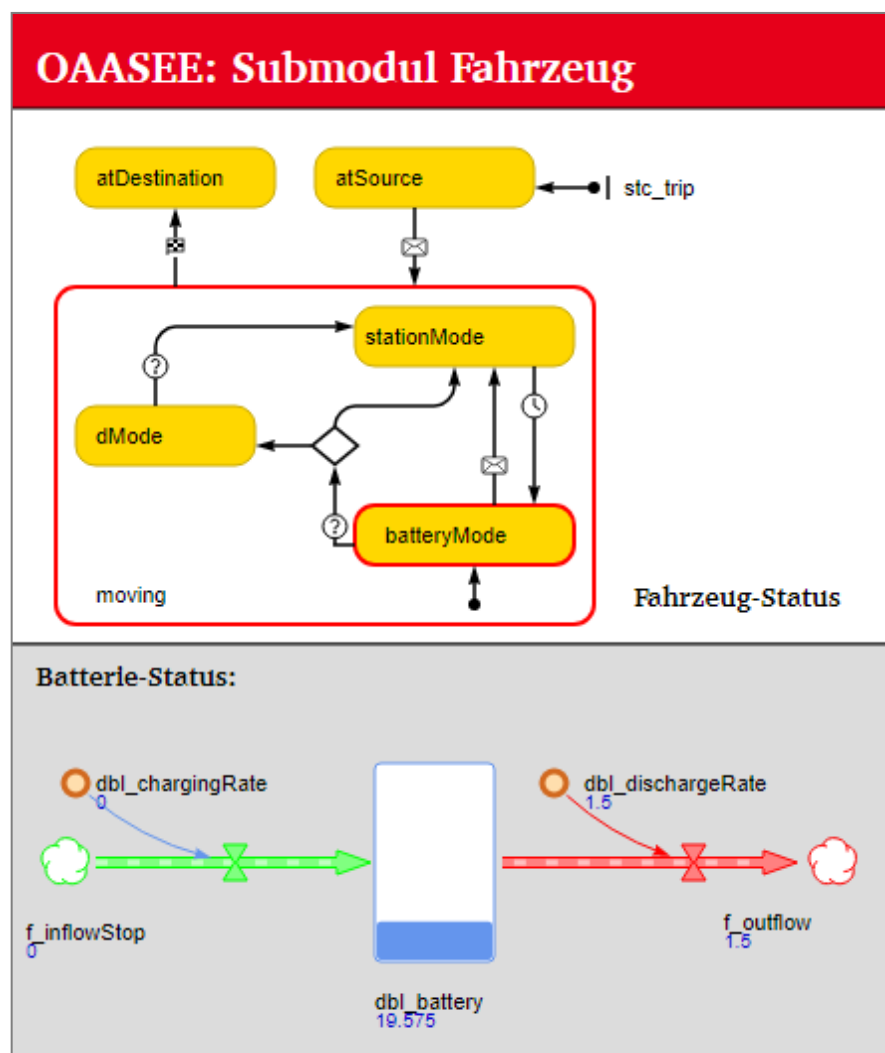


Abbildung A3-0-7: Übersicht des Submoduls Fahrzeug  
(Quelle: eigene Darstellung).

Während der **Fahrzeugbewegung** zwischen **Quell-** und **Zielpunkt** wird das **Laden** und **Entladen** des fahrzeugseitigen **Energiespeichers** simuliert, wofür das sog. *Submodul Fahrzeug* erstellt worden ist. Eine Übersicht des Submoduls Fahrzeug kann Abbildung A3-0-7 entnommen werden.



---

In Abhängigkeit des jeweiligen Status eines Lkw (d.h. Fahrend im Diesel,- Batterie oder Stationsmodus) werden hier **Energiezuflüsse und -abflüsse** in einen Energiespeicher bilanziert. Sobald dieser **Energiespeicher entleert** ist, wird in Abhängigkeit der aktuellen Position des Lkw im Verkehrsnetz geprüft, ob an dieser Stelle eine **neue Ladestation errichtet** werden kann. Zudem wird in regelmäßigen Abständen geprüft, ob auch bei noch nicht vollständig entladendem Energiespeicher eine **Ladung möglich** ist, d.h. das Fahrzeug sich gerade auf einer **bereits errichteten Station** befindet.

Zur **Errichtung neuer Ladestationen** wird einerseits die **Infrastrukturbewertung** des geraden befahrenen Streckenelements herangezogen, die hierfür vorab ermittelt worden ist. Andererseits wird geprüft, ob sich die aktuelle Position des Lkw noch auf dem **Autobahnnetz** befindet bzw. ganz generell ein Stationsbau an dieser Position erlaubt ist.<sup>44</sup> Zudem wird geprüft, ob ein entsprechendes **Budget** zur Stationserrichtung zur Verfügung steht. Werden diese Bedingungen erfüllt, wird eine **neue Ladestation in elektrotechnischer Basiskonfiguration** errichtet. Daran anschließend wechselt das Fahrzeug in den Stationsmodus, wodurch der Ladestrom freigeschaltet wird und sowohl der Fahr- als auch der Ladestrom zugeführt werden.

Wird hingegen eine **bereits errichtete Station** detektiert, wird auf Basis der Verkehrsstärke der aktuell durchgeführten Fahrt geprüft, ob diese Station bezüglich ihrer elektrotechnischen Dimensionierung angepasst werden muss. Zudem wechselt das Fahrzeug in den Lademodus. Sollte weder eine Station gefunden werden, die gerade befahren wird, noch die Errichtung einer neuen Ladestation möglich sein, wechselt das Fahrzeug im Falle von OH-Lkw in den Dieselmodus. Auf diesem Wege werden dann alle Relationen der jeweils zugrundeliegenden Relationsstichprobe abgewickelt.

Im Laufe der Lageermittlung mit OAASEE werden durch den Simulationsalgorithmus bestimmte **Daten** gesammelt und auf der Benutzeroberfläche aufbereitet dargestellt. Die erfassten Daten enthalten zum ersten die **Anzahl aller errichteten Ladestationen** sowie deren Lage im Raum als Geodaten. Zum zweiten werden für jede Station beschreibende Attribute wie die Verkehrsnachfrage festgehalten, sodass während der Laufzeit auch verschiedene Ausbaustufen (z.B. beim *eHighway*-System wie in Abschnitt XY beschrieben) implementiert und wichtige Parameter wie Ladeleistung oder Baukosten angepasst werden können. Zum dritten wird die Summe der **Errichtungskosten** für die Ladestationen sowie das noch zur Verfügung stehende **Budget** dargestellt. Zudem wird die **Fahrleistung** der Fahrzeuge erfasst, aus der sich dann **Verbräuche an Fahrstrom** bzw. **Kraftstoff** sowie tatsächliche und vermiedene **Emissionen** ermitteln lassen.

Nach Abschluss des Simulationsexperiments können die **Ergebnisse** mittels einer **Datenschnittstelle** z.B. in ein Tabellenkalkulationsprogramm, ein Geografisches Informationssystem (GIS) oder eine Datenbankanwendung **exportiert** werden. Dies gilt auch für Optimierungsexperimente, die die Ergebnisse des aus Sicht der Zielfunktion besten gefundenen Simulationsexperiments exportieren.

---

<sup>44</sup> So könnte z.B. auch das Errichten entlang Netzabschnitten einer niedrigeren Hierarchiestufe (z.B. Bundesstraßen) erlaubt werden. Derzeit wird die Errichtung nur auf Autobahnabschnitten gestattet.

---

## Datengrundlage

Die Datengrundlage einer jeden modellbasierten Untersuchung hängt notwendigerweise stark von dem jeweils bearbeiteten Anwendungsfall ab, so auch hier (siehe Kapitel 6). Trotzdem wurde bei der technischen Implementierung des in Kapitel 5 beschriebenen Verfahrens darauf geachtet, dass auch **andere als der in Kapitel 6 beschriebene Anwendungsfall eHighway** bei entsprechender Datenverfügbarkeit untersucht werden können. Daher wurden entsprechende **Softwaremodule** implementiert, die **universell** mit **Daten** gefüllt werden können. Neben den durch den Anwender festgelegten Parametern werden für ein Simulationsexperiment mit OAASEE zwei weitere Datenquellen benötigt.

OAASEE benötigt zum Ersten ein **Verkehrsnetzmodell** auf Basis räumlicher Daten (Format: Routinggraph aus ESRI-Shapefile erzeugt). Ein solches Verkehrsnetzmodell für Deutschland kann bspw. über die BAST oder bei der *Clearingstelle Verkehr* des *Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt* (DLR) bezogen werden. Das Shapefile kann **manuell** über eine von **AnyLogic** zur Verfügung gestellte **Schnittstelle** eingelesen und in einen routingfähigen **Graphen umgewandelt**, sodass im Ergebnis eine simulierte Fahrzeugbewegung entlang dieses Graphen möglich wird. Mit geringem Mehraufwand können also auch beliebige andere Netzausschnitte betrachtet werden. Hierfür sollte jedoch auch eine angemessene Rechenleistung zur Verfügung stehen.

Zum Zweiten werden **Quell- und Zielpunkte als Netzeinspeiseknoten** benötigt, zwischen denen sich die simulierten Lkw-Fahrten bewegen, mithin also auch die auf das Verkehrsnetz umgelegte Verkehrsnachfrage. Die Relationen dieser **Verkehrsverflechtungsmatrix** werden in Listenform eingelesen und als eine einzelne, fiktive Lkw-Fahrt auf dem Verkehrsnetz dargestellt. Die Datenerfassung erfolgt, wie bereits erwähnt, allerdings für die gesamte Verkehrsstärke zwischen einer Quelle und einem Ziel. Wegen dieses Aufbaus ist es möglich, neben Autobahn-Anschlussstellen als Quell- und Zielpunkten auch z.B. geometrische Zentren von Gemeinden, Städten oder Kreisen als Quell- und Zielpunkte zu verwenden, genauso wie logistische Standorte oder Umschlagpunkte. Hinsichtlich der **verwendeten Verflechtungsdaten** ist OAASEE also **flexibel**.

Für den Anwendungsfall Deutschland könnte die **Verkehrsnachfrage** z.B. über das BMVI beschafft werden (siehe Abschnitt 6.2.1). Diese Datenquelle kann z.B. auch für Korridoruntersuchungen verwendet werden, die Bezug zu bundesdeutschem Gebiet haben (Quell- und Zielverkehre mit einer ausländischen Verkehrszelle sowie Durchgangsverkehre). Für gesamteuropäische Analysen auf Ebene der Transeuropäischen Netze (TEN) bietet sich die ETIS-Datenbank (European Transport Policy Information System) als Quelle für die Verkehrsnachfrage an, die auch schon für solche Untersuchungen verwendet wurde (Korzhenevych 2012; o. A. 2005).

---

## Anhang 4: Überblick Gesamtverfahren

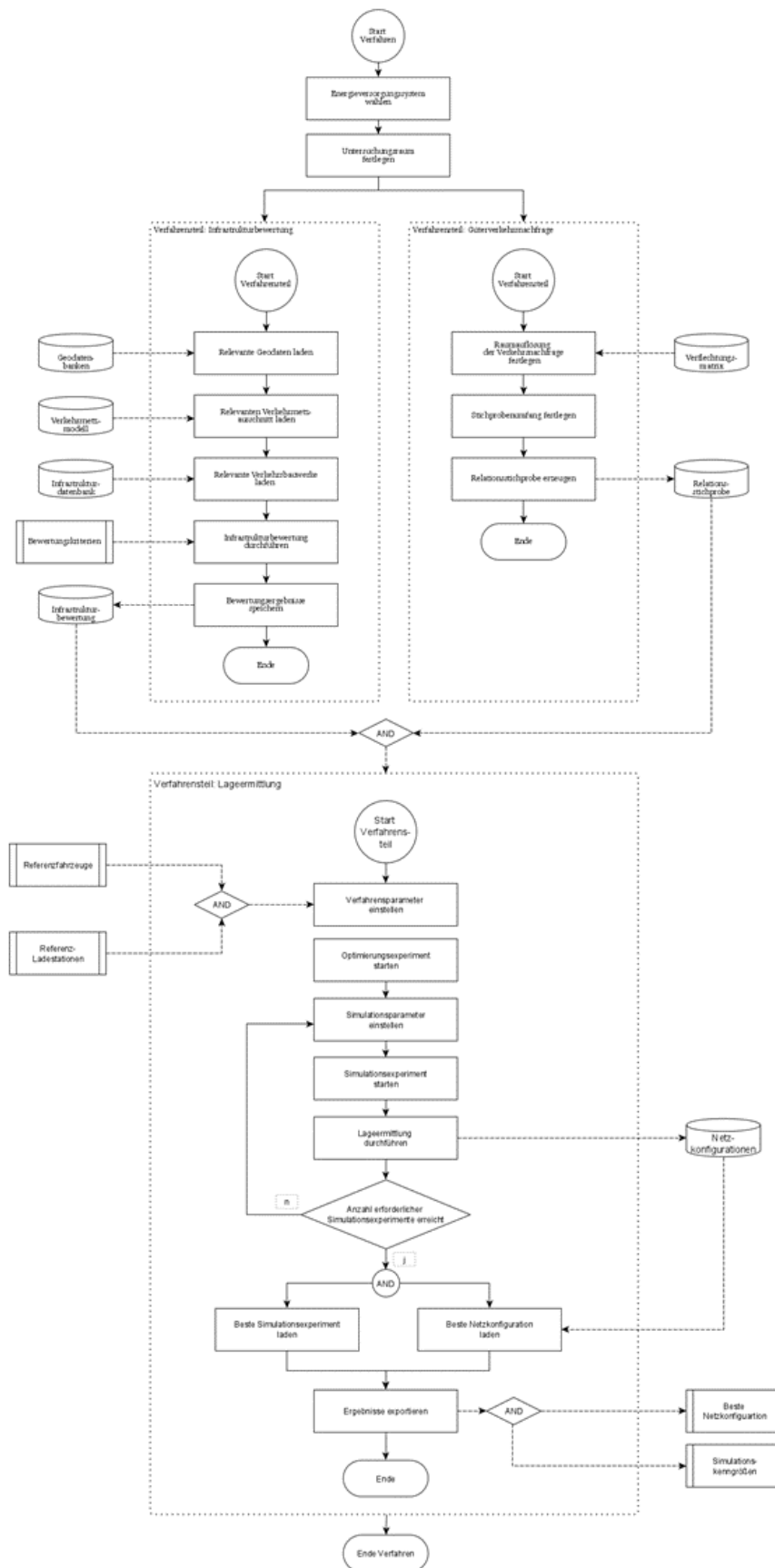


Abbildung A4-0-1: Überblick Gesamtverfahren (Quelle: eigene Darstellung, siehe auch Anlage 4).

---

## Anhang 5: Volkswirtschaftliches Systemoptimum

---

Wie bereits ausgeführt wurde, stehen der Streckenausstattungsgrad mit Systemen zur Energieversorgung von Lkw während der Fahrt sowie die Kapazität der in den Fahrzeugen vorzusehenden Energiespeicher in einer umgekehrt proportionalen Beziehung. Hier gilt als Faustformel: je höher die Flächenabdeckung der Ladeinfrastruktur (also der Streckenausstattungsgrad) ist, desto kleiner können die fahrzeugseitigen Energiespeicher ausfallen und *vice versa*. Die Mehrkosten für die Energiespeicher sowie für weitere Fahrzeugkomponenten in Relation zu den Diesel-Referenzfahrzeugen werden mit hoher Wahrscheinlichkeit aus dem privaten Sektor finanziert, das heißt durch die Nutzer der Fahrzeuge (z.B. Logistikdienstleister oder Handels- und Industrieunternehmen). Zudem entstehen weitere **Nutzerkosten**, z.B. anteilig umgelegte Betriebskosten der Ladestationen. Werden diese Kosten über alle Nutzer hinweg aufsummiert, resultieren die volkswirtschaftlichen Nutzerkosten auf der einen Seite.

Vermutlich werden die straßenseitig zu errichtenden Ladestationen der Systeme zur Energieversorgung des Elektroverkehrs durch die öffentliche Hand errichtet und betrieben werden, auch wenn mögliche privatwirtschaftliche Betreibermodelle diskutiert werden (siehe z.B. Hacker et al. 2020). Werden hier die anteiligen Infrastrukturkosten (z.B. Abschreibungen, Erhaltungsinvestitionen) sowie eventuell nicht auf die Nutzer umgelegte Betriebskosten (im Rahmen von Subventionen) summiert, ergeben sich die volkswirtschaftlichen **Betreiberkosten**.

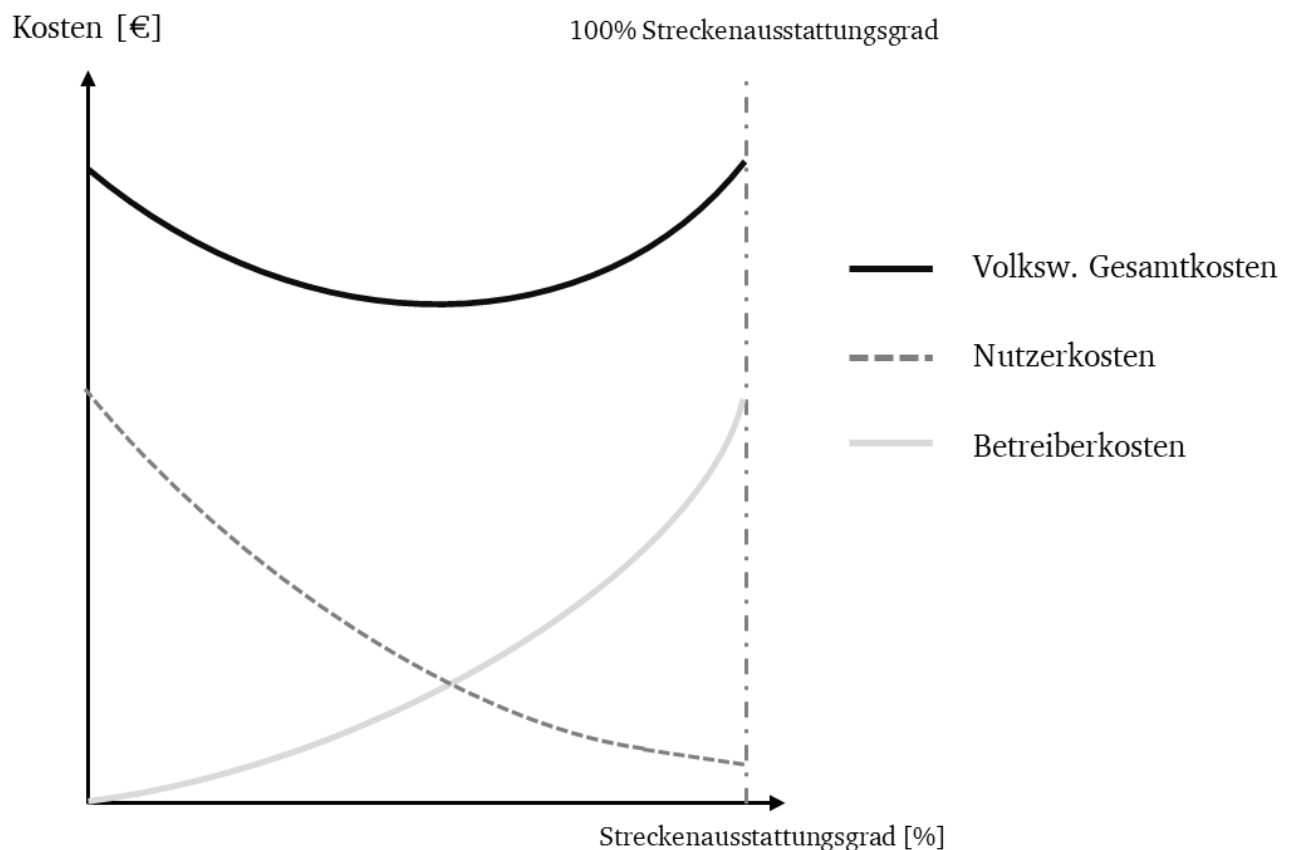


Abbildung A5-0-1: Illustratives Beispiel möglicher volkswirtschaftlicher Kostenverläufe für Energieversorgungssysteme während der Fahrt (Quelle: eigene Darstellung).

---

---

Die **Summe aus den Betreiberkosten** auf der einen Seite sowie der **Nutzerkosten** auf der anderen Seite ergeben die gesamten sog. **Gesamtsystemkosten**. Dieser Zusammenhang ist illustrativ mit beispielhaft abgetragenen Kostenfunktionen in Abbildung A5-0-1 dargestellt.

Die Minimierung der Gesamtkostenfunktion sollte einen volkswirtschaftlich optimalen Streckenausstattungsgrad liefern sowie, daraus abgeleitet, die optimale Dimensionierung von fahrzeugseitig verbauten Energiespeichern. Das hier vorgestellte, simulationsbasierte Optimierungsverfahren kann im Rahmen eines solchen volkswirtschaftlichen Bewertungsvorhaben eingesetzt und sinnfällig erweitert werden. Diese eher theoretischen Ausführungen bedürfen jedoch noch einer empirischen Untermauerung und sind daher eher als Denkanstoß zu interpretieren.